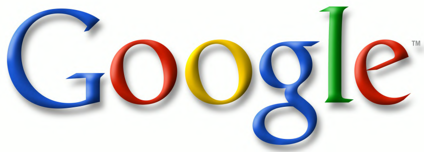
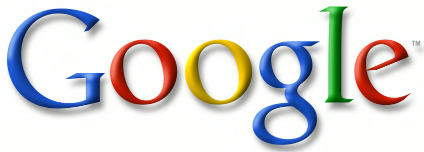

Google







Blaise Desgoffe pinx.^t *R.H. Digeon sc.*

LA BULLE DE SAVON

Phénomènes d'interférence

ANNEAUX COLORÉS DANS LES LAMES MINCES

Lamoureux Imp. 38, rue Lacépède.



LA BULLE DE SAVON

ANNEAUX COLORÉS DES LAMES MINCES

LES PHÉNOMÈNES

DE LA PHYSIQUE

PAR

AMÉDÉE GUILLEMIN

Auteur du CIEL

OUVRAGE ILLUSTRÉ

DE 457 FIGURES DESSINÉES PAR B. BONNAFOUX
ET GRAVÉES PAR CH. LAPLANTE
ET DE 11 PLANCHES IMPRIMÉES EN COULEUR

DEUXIÈME ÉDITION

PARIS

LIBRAIRIE DE L. HACHETTE ET C.

BOULEVARD SAINT-GERMAIN, N° 77

1869

PRÉFACE

DE LA PREMIÈRE ÉDITION.

L'esprit humain a senti de tout temps l'impérieux besoin de connaître les lois qui régissent les phénomènes physiques : étreindre la nature, la saisir dans ses opérations les plus mystérieuses, s'en rendre maître, en un mot, pour la faire servir aussi bien aux besoins de la vie matérielle qu'à ceux de la vie intellectuelle et morale, telle est la noble entreprise à laquelle se sont dévoués les plus grands génies. Trop longtemps l'homme erra dans cette âpre et souvent périlleuse poursuite du vrai : commençant par les interprétations fabuleuses, ces premiers bégayements de son enfance, il a peu à peu substitué des hypothèses aux fables mythologiques; puis, enfin, parvenu à comprendre la vraie méthode, celle de l'observation expérimentale, il est arrivé, après mille efforts, à donner, dans des formules immortelles, l'idée la plus générale des phénomènes principaux du monde physique.

Pour se mettre ainsi en communion avec la nature, notre intelligence puise à deux sources, également vives et pures, également fécondes, l'Art et la Science : mais c'est par des chemins différents, disons même par des méthodes opposées,

qu'elle atteint l'une et l'autre de ces sources, où l'homme peut étancher cette soif de l'idéal qui fait sa noblesse et sa grandeur, l'amour du beau, l'amour du vrai et du juste. L'artiste, en effet, se garde d'émousser la vivacité de ses impressions par une froide analyse ; l'homme de science, au contraire, n'aspire, en présence de la nature, qu'à en dépouiller la magnifique et poétique enveloppe, qu'à la disséquer, pour ainsi dire, afin d'en pénétrer tous les secrets; mais, tout en se réservant d'admirer à son heure, sa jouissance n'est pas moindre que celle de l'artiste, quand il est parvenu à reconstruire dans son unité intelligible ce monde de phénomènes dont sa puissance d'abstraction lui a livré les lois.

Il serait donc puéril de chercher dans l'étude des phénomènes physiques, faite au point de vue de la science pure, le charme des descriptions poétiques ou pittoresques; en revanche une telle étude est éminemment propre à satisfaire l'invincible tendance de notre esprit, qui nous pousse à connaître la raison des choses, cette fatalité qui nous domine, dont nous essayerions en vain d'enfreindre les lois, mais qu'il nous est possible de faire servir à la libre et légitime satisfaction de nos facultés.

Pesanteur, son, chaleur, électricité, lumière, telles sont les catégories sous lesquelles viennent se ranger les phénomènes dont la description fait l'objet de cet ouvrage. Nous ne nous sommes point borné, du reste, à un simple exposé des faits; nous avons essayé d'en faire saisir les rapports intimes, en d'autres termes les lois, tâche un peu ardue peut-être quand on n'appelle pas à son secours le langage si clair et si simple des mathématiques. Nous avons conçu et rédigé ce nouveau travail dans le même esprit que notre ouvrage d'astronomie intitulé LE CIEL; c'est assez dire que nous n'avons pas eu la pensée ni la prétention d'écrire un cours de physique : nous avons seulement tenté d'aplanir la voie à ceux qui veulent pousser plus loin leurs études, tout en donnant

aux gens du monde une idée suffisamment claire et juste de la science.

Pour rédiger cet essai d'une description des phénomènes de la physique, nous avons dû puiser à des sources nombreuses dont l'énumération serait trop longue, tant la science a reçu de développements depuis deux siècles; mais nous croirions manquer au plus simple devoir de justice, si nous ne donnions ici un témoignage de notre reconnaissance à l'un de nos plus savants physiciens, M. Le Roux, qui a bien voulu relire avec nous la plupart des épreuves de notre ouvrage et dont les conseils éclairés nous ont été si utiles.

Nous avons aussi à remercier M. Chevreul, qui nous a autorisé à reproduire trois planches de ses cercles et gammes chromatiques; puis notre excellent ami M. J. Silbermann, préparateur du cours de physique au Collége de France, qui a bien voulu surveiller la reproduction de quelques-uns des beaux tableaux où il a représenté plusieurs phénomènes optiques. Enfin, nous avons eu de précieux collaborateurs dans les artistes qui ont dessiné ou gravé, soit les figures du texte, soit les planches en couleur; citons parmi eux MM. Bonnafoux et Laplante, Digeon et Rapine.

AMÉDÉE GUILLEMIN.

Orsay, novembre 1867.

INTRODUCTION.

« La nature n'est pas une masse inerte; elle est, pour celui qui sait se pénétrer de sa sublime grandeur, la force créatrice de l'univers, force sans cesse agissante, primitive, éternelle, qui fait naître dans son propre sein tout ce qui existe, périt et renaît tour à tour. »

SCHELLING.

Je voudrais, avant d'entrer en matière, essayer de donner une idée des faits que je me propose de décrire dans cet ouvrage, et de la science qui a pour objet l'étude de leur enchainement ou de leurs lois. Quand on parle de physique aux personnes étrangères aux sciences positives, on éveille le plus souvent dans leur esprit la pensée de faits plus ou moins extraordinaires, qui se produisent dans des circonstances exceptionnelles, à l'aide d'appareils ou d'instruments spéciaux : en un mot, il leur semble qu'on les entraine sur un terrain réservé, et loin de celui où se passe notre existence journalière. Le nom de *phénomènes physiques* par lequel on caractérise les faits en question, favorise encore cette tendance à voir quelque chose de mystérieux dans une science, dont l'objet est au contraire constamment sous nos yeux, qui enveloppe tous nos actes, à tous les instants de notre vie, dont

chaque être, chaque corps animé ou inanimé ne cesse de subir les lois. Quelques exemples suffiront pour mettre cette vérité dans tout son jour.

Voici une cloche de verre. Que je la prenne à la main, et aussitôt j'éprouve, en la soulevant, une certaine difficulté qui se traduit en moi par le sentiment de l'effort que font, pour la soutenir, les muscles de ma main et de mon bras. Je sais que, si elle vient à m'échapper, elle tombera à terre. Tout autre corps, solide ou liquide, me fera éprouver la même sensation, et, dans les mêmes circonstances, produira les mêmes effets ou du moins des effets analogues; et il en est encore ainsi de mon corps, dans ses membres isolés, comme dans son ensemble : tout habitué que je suis à faire effort pour le maintenir en équilibre, je n'en ai pas moins la conscience de cet effort comme pour les corps étrangers. On a, de tout temps, exprimé cette propriété des corps en disant qu'ils sont pesants; mais à la vérité, ce n'est guère que depuis deux siècles que la science a reconnu la généralité absolue de la pesanteur, c'est-à-dire a fait voir que les corps gazeux, tels que l'air, les vapeurs, sont pesants tout comme les liquides et les solides, et que les astres, soleil, lune, étoiles n'échappent pas à la commune loi. On a été plus loin : en étudiant les conditions de l'équilibre ou de la chute des corps pesants à la surface de la terre, on a fait voir qu'elles sont précisément les mêmes qui président aux mouvements et à la pondération réciproque des corps célestes. La pesanteur est une force universelle.

Maintenant qu'est-ce que cette force? Est-ce une propriété

inhérente à la matière tangible? N'est-ce que la réaction de mouvements qui se produisent dans une matière intangible, partout universellement répandue, et qu'on nomme éther? On ne sait encore, bien que les savants penchent aujourd'hui vers la seconde solution. Quoi qu'il en soit, c'est là l'une des propriétés générales des corps qu'on étudie en physique. Les effets, très-variés, qui résultent de cette propriété constituent, sous le nom de *phénomènes de la pesanteur*, l'un des objets de la physique : l'étude des lois qui les régissent forme la première branche de cette science générale.

II

Je reprends maintenant ma cloche de verre, et frappant légèrement ses parois à l'aide d'un corps solide, d'un marteau de bois, je suppose, j'entends aussitôt un son plus ou moins prolongé, plus ou moins grave, qui, après s'être graduellement affaibli, finit par s'éteindre. Qu'est-ce que ce son, comment de la cloche parvient-il à notre oreille? Beaucoup d'entre nous l'ignorent; nous savons seulement que cette propriété de rendre des sons, de produire du bruit quand on les frappe, qu'on les ébranle de diverses manières, appartient à tous les corps, qu'ils affectent l'état solide ou liquide, ou l'état gazeux. Jadis, quand, par le fait de l'ignorance à peu près absolue où l'on était des modes d'action de la nature, on avait une tendance instinctive à tout expliquer par l'intervention de causes occultes, on voyait dans le son un être particulier, un agent immatériel qui, émané des corps sonores sous l'influence de la percussion ou du frottement, pénétrait dans notre

organisme et y produisait cette sensation particulière. Mais les expériences des physiciens n'ont pas tardé à faire justice de cette chimère, et ont démontré que le son, considéré en lui-même, c'est-à-dire dans les corps qui lui donnent naissance, est tout simplement un mode de mouvement des molécules qui exécutent des oscillations, comme tous les corps élastiques qu'on a dérangés de leur position d'équilibre. Ces vibrations se communiquent de proche en proche au milieu où est plongé le corps sonore, et, dans certaines limites de rapidité, ébranlent l'organe de l'ouïe, de manière à donner à l'homme et aux animaux cette sensation particulière du bruit ou du son.

L'*acoustique* étudie cette propriété nouvelle des corps dans toutes les circonstances où elle se manifeste et forme une seconde branche de la physique. Ce n'est, d'ailleurs, d'après ce que nous venons de dire, qu'une partie de la science plus générale qu'on nomme l'*élasticité*.

III

Revenons à notre cloche de verre. Si je la touche avec la main, j'éprouve, outre le frémissement qui accuse l'existence de ses vibrations à supposer qu'elle résonne encore, une sensation d'une tout autre nature, qui naît très-rapidement au simple contact, et me fait dire qu'elle est froide, par exemple. Si avant cette nouvelle expérience, j'avais eu soin de présenter la cloche au feu, ou de l'exposer aux rayons du soleil, il en serait résulté pour moi une sensation, en apparence opposée à la première : la cloche m'eût paru chaude.

Mais l'expérience apprend à tout le monde que le chaud et le froid sont des degrés différents d'une seule et même manière d'être des corps, d'une nouvelle propriété que nous connaissons tous, au moins dans ses effets sensibles, sous la dénomination générique de chaleur. De là, toute une classe de phénomènes physiques, aussi intéressants par leurs applications pratiques que par les lois qui en constituent la théorie : les variations de volume, les changements d'état des solides, des liquides et des gaz, les échanges de chaleur par voie de contact, de rayonnement, de réflexion. De là, une troisième branche de la physique, la *Chaleur*.

Maintenant, la même question s'est posée pour la chaleur que pour la pesanteur et pour le son : Qu'est-ce que c'est que la chaleur? Longtemps, pour expliquer les phénomènes, on s'est cru dans la nécessité d'imaginer un agent spécial, une entité particulière, le calorique qui, existant en proportions différentes dans les corps de nature ou d'état divers et s'échangeant de l'un à l'autre, comme un fluide invisible et insaisissable, était destiné à rendre compte de tous les effets observés.

Ce sera sans doute l'un des plus beaux titres scientifiques de notre siècle que d'avoir fait évanouir, sous le flambeau de l'expérience et du calcul, tous ces agents occultes, mystérieux qui, n'ajoutant rien aux faits, n'avaient pour moindre inconvénient que d'en masquer la véritable nature. Qu'est-ce donc que la chaleur dans la physique nouvelle? Rien autre chose qu'un mode particulier de mouvement, le même à l'origine qui produit la lumière et probablement l'électricité et la pesanteur. C'est, d'abord, un état vibratoire des sources proprement dites, c'est-à-dire des corps à l'état d'incandescence; le mouvement d'oscillation de leurs molécules se communique à l'éther sous forme d'ondes qui se propagent avec l'énorme

vitesse de 75 000 lieues par seconde, et de là, dans tous les milieux solides, liquides, gazeux, dont les molécules, à eur tour, se trouvent ébranlées, et qui jouent alors le rôle de sources secondaires de chaleur.

Le fait capital qui légitime ces conclusions hardies est celui-ci : Une quantité donnée de chaleur est susceptible de se transformer en une quantité de mouvement toujours la même, c'est-à-dire de produire un travail mécanique déterminé; et réciproquement, cette même quantité de travail, à l'état de mouvement sensible, produit la quantité de chaleur primitive. C'est dire que les phénomènes de chaleur et les phénomènes de mouvement se transforment les uns dans les autres, se manifestant par l'intermédiaire des corps ou de la matière sous des formes variées, mais au fond toujours égaux en intensité. C'est dire que, de la même façon que la chimie prouve l'indestructibilité de la matière, la physique démontre l'indestructibilité du mouvement : en un mot, la même quantité de mouvement existe perpétuellement dans l'univers, quels que soient les modes d'activité de la matière.

Car, si la démonstration dont nous parlons ici n'est qu'ébauchée, si l'identité des causes n'est conçue clairement encore que pour la chaleur et la lumière, ou mieux, pour les radiations calorifiques, lumineuses et chimiques, il est évident pour tous les esprits philosophiques, que les anciens fluides ont fait leur temps, et que c'est seulement pour la commodité du langage que les physiciens parlent encore des fluides électriques et magnétiques, aujourd'hui d'ailleurs réduits à un seul. Quelle perspective magnifique ouverte à l'horizon de la science!

IV

En même temps que les phénomènes de la physique, pesanteur, son, lumière, chaleur, mouvement mécanique, électricité, tendent à ne plus former qu'une même série dont les termes sont réductibles les uns dans les autres, à mesure que les diverses branches de la physique peu à peu se réduisent à l'unité, de manière à ne former que des corollaires de la mécanique rationnelle, l'étude expérimentale de ces variétés du mouvement universel enrichit la science de faits nouveaux, jusqu'alors inconnus. Nombre de ces faits ont surgi de l'obscurité où l'ignorance les avait relégués jusqu'alors : ils étaient là, près de nous, aussi fréquents, aussi nombreux que les faits plus apparents que nos sens nous révélaient sans étude, ne demandant pour apparaître à tous les yeux, que les recherches persévérantes des observateurs et cette sagacité vive et profonde à la fois qu'on nomme le génie.

Par exemple, dans cette branche de la physique qui, par sa nature même, semble accessible à tous, ayant pour objet l'étude des phénomènes de la lumière, quelle richesse de faits accumulés depuis deux siècles! La double réfraction dans certains cristaux, les phénomènes de diffraction et d'interférence, et notamment cette modification particulière des rayons lumineux qu'on nomme polarisation; puis, l'analyse même des sources lumineuses, ou la séparation des rayons en diverses couleurs, se distinguant en même temps par leur intensité lumineuse, par leurs propriétés calorifiques et chimiques, par l'extinction des ondes en certains points:

d'où la création de cette méthode délicate d'analyse qui décèle l'existence de métaux jusqu'alors inconnus, et a rendu possible l'étude de la constitution chimique des astres les plus éloignés de nous, du soleil, des étoiles, des nébuleuses.

Les phénomènes sur lesquels nous venons de jeter un rapide coup d'œil étaient, au moins dans leur généralité, connus depuis des siècles dans leurs manifestations ordinaires, et cela est tout simple, puisque la plupart se voient, se touchent, affectent nos sens à tout instant : tous, nous savons sommairement ce qu'est la pesanteur, le son, la chaleur et la lumière. Le triomphe de la science moderne, c'est-à-dire de la physique expérimentale, est de les avoir mesurés, décrits, calculés, d'en avoir découvert les lois, d'avoir montré comment ils se produisent, se développent, se lient et s'enchaînent.

Mais en dehors de ces quatre séries de faits, il en est d'autres qui, il y a deux siècles, étaient pour ainsi dire inconnus des ignorants, comme des savants. Depuis deux mille ans, on connaissait la faculté que possède l'ambre frotté d'attirer les corps légers, celle qui appartient à une pierre nommée aimant d'attirer le fer : les Chinois, il est vrai, avaient inventé la boussole ; mais c'est tout ce qu'on savait du magnétisme. En vain, dans les orages, une puissance mystérieuse nous éblouissait des feux de l'éclair et nous épouvantait des roulements de la foudre : nous ne savions rien de l'électricité. Aujourd'hui, quelle richesse, quelle magnificence dans cette branche nouvelle des phénomènes de la physique ; quels étonnants résultats dans leurs applications scientifiques, artistiques et industrielles! Cette même force, que les anciens mettaient entre les mains de Jupiter tonnant, dont les superstitions du moyen âge et des temps modernes faisaient un moyen de terreur reli-

gieuse, l'homme la conduit à sa guise, s'en sert pour transmettre au loin sa pensée, avec la vitesse de la foudre, en fait l'ouvrier le plus docile, le mécanicien le plus habile et le plus ingénieux. Tantôt, elle argente, elle dore les métaux, tantôt, elle reproduit les plus fines ciselures avec la précision du mouleur, ici donne une lumière d'un éclat comparable à celui du soleil ; là, source de chaleur d'une intensité prodigieuse, elle fond, volatilise les métaux les plus durs et les plus denses.

C'est à toute cette série de faits, nouvellement produits, que le génie de la science moderne a fait pour ainsi dire jaillir du sein des corps où la nature les cachait, et qui constituent la science de l'électricité et du magnétisme, qu'on pourrait réserver le nom de *phénomènes*, dans l'acception où on prenait encore ce mot il y a un siècle, il y a tout au plus un siècle. Malgré des progrès immenses, des travaux qui ont fait connaître plusieurs des lois qui les régissent, on n'a pu encore, en effet, les analyser aussi profondément que les phénomènes de la lumière, du son, et on en est toujours réduit, pour en expliquer les causes, à des hypothèses. Mais de ce qu'il y a là un inconnu, ce n'est pas une raison pour faire intervenir aucune de ces entités chimériques, qui, dans les autres branches de la science, se sont évanouies par le fait tout simple d'une étude plus complète, plus approfondie.

V

Telles sont les principales propriétés des corps ou de la matière qui font l'objet de la physique, et dont cet ouvrage a pour but de passer en revue les manifestations variées. Il se-

rait tout à fait superflu d'insister sur l'utilité d'une telle étude : dans l'ordre des choses pratiques, cette utilité est si évidente, elle répond à des besoins si fréquents au milieu de nos sociétés dites civilisées, elle est si bien de tous les jours, de tous les lieux et de tous les instants, que personne ne peut avoir la pensée de la méconnaître. Mais dans l'ordre intellectuel, elle a bien, selon nous, une autre portée. D'abord, elle répond à cette curiosité instinctive qui pousse tous ceux qui pensent, ne fût-ce qu'à des intervalles éloignés, à se demander ce qu'est ce monde qui nous entoure et dont nous faisons partie, ce que sont les corps, ce qu'est la matière, ce substratum dont la trame des phénomènes est tissue. Les esprits superficiels seuls s'étonnent de voir poser une question pareille, sans doute parce qu'ils croient parfaitement savoir ce dont ils ignorent le premier mot.

Qui pourrait, en effet, dire ce qu'est la matière, sans connaître à fond ses propriétés physiques, sans avoir une notion précise, mathématique des divers états sous lesquels elle apparaît à nos yeux et devient sensible à nos organes, quelles sont les conditions des changements incessants que nous lui voyons subir. Et encore, même pour le physicien, pour le chimiste, et en faisant abstraction de la forme particulière sous laquelle elle apparaît dans les corps organisés et vivants, que d'inconnus dans la constitution intime de la matière ? Vous prenez un morceau de métal, de platine, je suppose ; sa dureté, son poids en font pour vous et pour tout le monde comme le symbole de tout ce qu'il y a de plus compacte, de plus solide, et pour ainsi dire d'impénétrable. Cependant il n'est pas douteux que les molécules, que les atomes de cette masse ne se touchent pas, qu'il y a entre eux des distances beaucoup plus considérables que ne sont leurs propres diamètres, de sorte que le morceau de métal renferme plus de vide que de plein.

Comment ces points matériels sont-ils groupés? Quelle prodigieuse force les maintient unis ensemble, au point qu'il faut exercer des efforts considérables, non pas pour les séparer, puisqu'ils ne se touchent pas, mais pour augmenter leurs distances mutuelles et détruire la cohésion qui les maintient dans cet état d'équilibre.

Saurons-nous jamais quels mouvements de rotation animent les atomes, quelle est leur forme, quelles actions et réactions ont lieu entre les molécules matérielles proprement dites et le milieu où elles baignent, l'éther? Si l'on parvient un jour à résoudre ces problèmes délicats et difficiles, ce sera grâce à l'union féconde de l'observation expérimentale et de la méthode analytique dont les sciences mathématiques sont le produit admirable. Partout, dans les divers points encore obscurs des branches de la physique, on se heurte aux questions de physique moléculaire, traits d'union entre cette science et la chimie : la capillarité, les phénomènes d'osmose et de dialyse, la pénétration des gaz, la thermo-chimie, la photo-chimie, l'électro-chimie, voilà tout un ordre de faits, des sciences à peine explorées, malgré de précieuses et récentes recherches, qui jettent déjà un jour, une lueur sur le problème si intéressant de la structure moléculaire des corps.

On ne peut s'empêcher de croire, en voyant quel vaste champ s'ouvre à la science de l'avenir, que nos arrière-neveux souriront peut-être, quand l'histoire leur apprendra que notre siècle avait la prétention d'être le siècle des lumières. Toutefois, ce n'est pas sans reconnaissance qu'ils verront par quels efforts la carrière leur a été ouverte dans le domaine des sciences physiques et naturelles.

LES PHÉNOMÈNES
DE
LA PHYSIQUE.

LIVRE PREMIER.

LA PESANTEUR.

CHAPITRE I.

PHÉNOMÈNES GÉNÉRAUX DE LA PESANTEUR.

§ I. ACTION DE LA PESANTEUR A LA SURFACE DE LA TERRE. PHÉNOMÈNES D'ÉQUILIBRE ET DE MOUVEMENT.

Une pierre, qu'on abandonne à elle-même d'une certaine hauteur dans l'atmosphère, se précipite et ne s'arrête dans son mouvement qu'après avoir touché le sol; un corps de forme arrondie, une boule solide roule le long d'un plan incliné à l'horizon; une masse liquide, comme celle d'un ruisseau ou d'un fleuve, coule sur la surface en pente qui lui sert de lit; la fumée, la vapeur d'eau s'élèvent dans l'air; tous ces phénomènes et bien d'autres que nous allons passer en revue, sont des manifestations variées d'une même force

qui paraît universellement répandue dans la nature, la ***Pesanteur.***

Tous les corps, sans exception, qui existent à la surface de notre planète, dans les profondeurs du sol et dans les couches gazeuses dont est formée son atmosphère, sont pesants. C'est un fait d'expérience qui, pour les corps solides et les liquides, n'a besoin d'être démontré à personne, et nous aurons bientôt l'occasion de prouver qu'il se vérifie de même pour les gaz et les vapeurs.

Ce n'est pas seulement par des phénomènes de mouvement que se montre à nous l'action de la pesanteur; cette action s'exerce aussi d'une manière incessante sur les corps qui nous paraissent en repos et qui, en réalité, ne sont qu'en équilibre[1]. La pierre qui a touché le sol, et dont notre œil a pu suivre le mouvement pendant sa chute, continue à peser sur les corps qui désormais la soutiennent; et cette pression, qu'on peut rendre manifeste par la tension constante d'un ressort (fig. 1), devient sensible à nos organes par l'effort que la main est obligée de faire pour soutenir la pierre. Un livre, posé sur une table, reste immobile, mais presse sur son appui, qui lui-même presse sur le sol. Une masse de métal suspendue à l'extrémité inférieure d'un fil, d'une corde flexible, tend le fil ou la corde; cette tension, qui persiste tant qu'on ne coupe pas le fil suspenseur, témoigne de l'action continue de la force sur le corps suspendu.

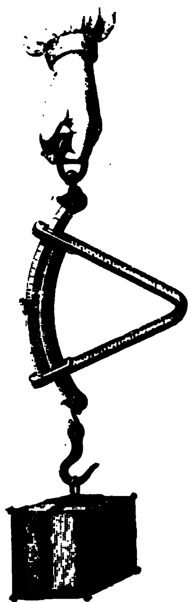


Fig. 1. — Action de la pesanteur rendue manifeste par la tension d'un ressort.

Ainsi, ne nous y trompons pas : l'immobilité n'est pas synonyme d'inaction, et nous pouvons assurer que, sur la Terre,

1. On ne connaît pas, dans l'univers, de corps qui soit dans un repos absolu.

aucun corps, aucune molécule matérielle solide, liquide ou gazeuse, n'est soustraite, en aucun instant de la durée, à l'action de la pesanteur.

L'astronomie nous enseigne que la Terre a la forme d'une boule à peu près sphérique, animée de deux mouvements d'ensemble, c'est-à-dire de deux mouvements auxquels participent à la fois toutes les portions de sa masse; l'un de rotation uniforme autour d'un de ses diamètres, l'autre de translation, qui l'entraîne avec une vitesse variable le long d'une orbite ayant le Soleil pour foyer. Mais ni l'un ni l'autre de ces mouvements n'affectent directement l'équilibre de ses diverses parties. Les masses solides qui constituent son écorce, le noyau probablement à l'état de fusion incandescente qui en forme l'intérieur, la partie liquide de sa surface ou les océans, l'enveloppe gazéiforme enfin qui entoure de toutes parts le sphéroide, sont dans un état de stabilité relative, résultant des pressions mutuelles dues à la force de la pesanteur.

Il paraît certain que la Terre tout entière a jadis été fluide, et que les diverses couches dont son intérieur est formé se sont rangées dans l'ordre même de leurs densités, c'est-à-dire les plus lourdes au centre, les plus légères à la surface, selon les conditions mêmes que l'expérience a démontré être nécessaires à la stabilité des liquides et à leur équilibre sous l'action de la pesanteur. Mais, pour ne parler que des parties accessibles à l'observation, on voit que tel est précisément l'ordre de leur succession. A la base, la masse solide ou le *sol;* vient ensuite, sur les trois quarts de la surface, la partie *liquide* ou la *mer;* puis au-dessus des unes et des autres les substances gazeuses ou l'*air*.

Ces diverses parties pèsent les unes sur les autres.

Examinons le sol des continents ou des îles. Partout la forme de son relief est telle que toutes ses parties se servent mutuellement d'appui. Dans les montagnes comme dans les plaines, la pesanteur agissant sur les dernières molécules a disposé les masses, de façon que l'équilibre ne soit pas, ou

du moins soit rarement rompu. Supprimez par la pensée l'action de la pesanteur, et les autres forces physiques, ne trouvant plus de résistance, bouleverseront les terrains, les rochers et les montagnes, et substitueront partout à l'ordre qui provient de la stabilité des masses, le désordre et la confusion.

C'est pareillement la pression de la pesanteur que l'homme utilise pour édifier, à l'imitation de la nature, ses constructions les plus durables. La masse des matériaux, leur disposition verticale, ou mieux encore inclinée en talus, comme dans les pyramides d'Égypte, ont permis à quelques-uns des monuments construits par l'homme de défier l'action des éléments et des siècles. Nous aurons l'occasion de voir dans la seconde partie de cet ouvrage d'autres applications de la force de la pesanteur aux arts et à l'industrie.

La pesanteur maintient aussi les masses d'eau dans leurs lits naturels, les lacs et les mers dans leurs bassins, où ces masses resteraient en repos, si des forces extérieures ne venaient perpétuellement agiter leurs couches superficielles. Il arrive que, sous l'influence de causes irrégulières et d'origine terrestre, comme les tremblements de terre et les vents, auxquelles viennent se joindre les oscillations périodiques des marées, la mer soulevée à de grandes hauteurs sort parfois de ses limites. Mais bientôt elle se trouve ramenée à son état habituel d'équilibre, soit par le propre poids de ses éléments, soit par les frottements qu'ils éprouvent, double cause de stabilité dont l'origine est également la pesanteur. Circonstance remarquable ! Laplace ayant cherché quelles sont les conditions nécessaires à la stabilité absolue de l'équilibre des mers, a prouvé qu'il suffisait que la densité des eaux de l'Océan fût moindre que celle de la Terre, condition qui est précisément réalisée dans la nature : plus légères, les eaux de la mer seraient dans un perpétuel état de mobilité ; plus lourdes, les écarts d'équilibre dus à des causes accidentelles pourraient être considérables et occasionner sur les continents et les îles d'effroyables catastrophes.

Mais la continuité de l'action de la pesanteur n'a pas lieu seulement dans les masses qui composent le sol et les eaux; les couches de l'air y sont également soumises; sans cette pression qui les retient appuyées sur le sol, l'élasticité ou la force d'expansion qui est, nous le verrons bientôt, une propriété constitutive des gaz, se joindrait à la force centrifuge de la rotation de la Terre, pour dissiper l'atmosphère dans l'espace.

Tels sont, dans leur ensemble, les phénomènes dus à l'action continue et latente, pour ainsi dire, de la pesanteur sur notre globe. C'est elle qui maintient partout l'équilibre, et qui le rétablit, quand il a été troublé par l'action des autres forces physiques.

Les phénomènes de mouvement dus à la même force ne forment pas un tableau moins intéressant ni moins grandiose.

L'infiltration des eaux dans le sol à diverses profondeurs est le produit de cette irrésistible tendance de tous les corps vers le centre de la Terre. Cette infiltration peu à peu désagrége les terrains et les roches, et, rompant l'équilibre, donne lieu aux éboulements qui dénudent les flancs des montagnes et des collines, et à la longue comblent les vallées. De tels phénomènes n'ont pas la pesanteur pour unique origine, et nous verrons plus loin comment son action se combine avec celles des autres forces physiques ou chimiques et notamment de la chaleur, pour déterminer la plupart des mouvements dont la surface de notre globe et son atmosphère sont le perpétuel théâtre. Toujours est-il qu'à un moment donné, la gravité terrestre devient prépondérante.

Souvent le travail de désorganisation reste inaperçu jusqu'à l'instant où éclate la catastrophe. Des masses de roches considérables, minées à leur base, tout à coup perdent leur équilibre, et glissent ou se précipitent, détruisant tout sur leur passage. Des montagnes entières ont ainsi recouvert de leurs débris des villages et des villes, et l'histoire a enregis-

tré de nombreux exemples de ces terribles événements. Au treizième siècle, le mont Grenier, dont le sommet domine encore les montagnes qui bordent au sud la vallée de Chambéry, s'écroula en partie, et ensevelit la petite ville de Saint-André et plusieurs villages : on montre encore les *abîmes de Myans*, sous lesquels gisent les débris et les victimes. En 1806, un éboulement non moins terrible précipita, des flancs du mont Ruffi dans la vallée de Goldau, une masse énorme de rochers qui ensevelirent complétement plusieurs villages et comblèrent une partie d'un petit lac voisin. Il serait superflu de montrer par des calculs quelle est la puissance destructive de semblables masses, précipitées par la pesanteur, d'une hauteur souvent prodigieuse, et dont la vitesse s'accélère avec la distance.

Les avalanches sont des phénomènes du même ordre, d'ailleurs beaucoup plus fréquents que les éboulements de roches et de montagnes. Les masses de neige, accumulées sur le flanc incliné d'une montagne, ou sur le bord d'un précipice, glissent sous leur propre poids, puis se détachent et tombent, broyant tout dans leur chute. Souvent il suffit d'un faible choc, d'un coup de pistolet, d'un cri même pour déterminer la rupture de l'équilibre et provoquer le phénomène. Dans les ice-bergs, ou montagnes de glace des régions polaires, la pression des blocs les uns sur les autres donne lieu à des phénomènes analogues, où la force irrésistible de la pesanteur manifeste encore sa puissance. Les glaciers, ces fleuves de neige solidifiée, passée à l'état de glace compacte, descendent les pentes des montagnes sous la pression du poids des couches supérieures qui les forment : ce mouvement de progression lente est si énergique, que les roches latérales et sous-jacentes sont striées et polies par la masse cristalline et par les débris de pierres et de cailloux qu'elle entraîne[1].

Dans les éruptions volcaniques, les forces explosives des

1. Voyez les chapitres consacrés à la description des glaciers, dans le beau livre d'Élisée Reclus, La Terre.

gaz intérieurs projettent souvent dans l'atmosphère des cendres, des fragments de pierre et de véritables rochers. Mais, si ces masses semblent un moment soustraites à l'action de la gravité, la lutte des deux forces n'est pas de longue durée, et les projectiles obéissent à l'invincible loi de tous les corps terrestres. C'est cette même loi qui détermine la chute de la grêle, de la pluie, de la neige, c'est-à-dire des particules de vapeur aqueuse que leur condensation a rendues plus lourdes que les couches où elles s'étaient élevées, sous les influences combinées de la chaleur et de la pesanteur même.

Voilà pour la chute proprement dite des corps dont l'équilibre s'est trouvé rompu par une cause quelconque. Mais il est, à la surface de notre planète, toute une série d'autres mouvements où la pesanteur joue le premier rôle, et dont la continuité produit une admirable circulation, sans laquelle la vie elle-même serait bientôt éteinte.

L'incessante évaporation des masses liquides donne lieu à la formation des nuages, et c'est la différence de pesanteur de l'air et des molécules de vapeur dont ils sont formés qui cause leur mouvement ascensionnel. Les eaux des pluies, dues à la chute de ces mêmes masses liquéfiées et condensées, gagnent sous l'action de la gravité terrestre les lieux les plus bas, forment les ruisseaux, les rivières et les fleuves : suivant alors la pente naturelle du sol, les masses fluviales gagnent les bassins des mers, tantôt coulant avec une majestueuse lenteur, tantôt roulant avec plus de vitesse et de fracas sur un lit plus accidenté. Parfois, arrêtées par des obstacles naturels, les eaux s'épandent sous la forme de lacs; ou bien, arrivant au bord d'une paroi de rochers, elles se précipitent en cascades : telles sont les chutes du Rhin à Schaffouse, du Niagara dans l'Amérique du Nord, et les cataractes du Zambèze, dans l'Afrique australe.

Les courants ne sont pas particuliers à la partie solide de la surface de la Terre : l'Océan est sillonné par de véritables fleuves dont les mouvements réguliers sont déterminés par la

pesanteur, bien qu'ils aient pour origine les variations d'un autre agent physique, c'est-à-dire de la chaleur. C'est encore la pesanteur qui régit tous les mouvements de la masse gazeuse atmosphérique, en combinant sa puissance, qui jamais ne se repose, avec l'action des autres forces naturelles.

En résumé, il n'est pas un phénomène terrestre, où la pesanteur n'intervienne à tout instant, tantôt pour concourir à l'équilibre, tantôt pour engendrer le mouvement. Alors même qu'elle semble détruite ou contrebalancée, elle agit, perpétuellement présente partout où se trouve une molécule, en apparence invariable, autant dire d'après les notions que l'expérience nous a données de la matière, indestructible, éternelle.

§ II. LA PESANTEUR DANS LES ESPACES CÉLESTES; GRAVITATION UNIVERSELLE.

Tous les phénomènes, dont nous venons d'esquisser un tableau d'ensemble, sont dus à l'action d'une même cause, ou d'une même force, puisqu'on est convenu de donner cette dernière dénomination à toute cause susceptible de produire le mouvement d'un corps, de modifier ce mouvement, ou encore de concourir à l'état d'équilibre.

Quelle est l'essence de cette force? C'est là un problème que la science ne cherche point à résoudre : elle se borne à en étudier les effets, à trouver la loi qui les régit, et nous allons voir qu'elle y est complétement parvenue. La direction de la pesanteur, c'est-à-dire la ligne suivant laquelle le corps pesant tend à se mouvoir et se meut en réalité, quand il n'éprouve pas de résistance, le point où la force est appliquée, et enfin son intensité, ou l'énergie avec laquelle elle sollicite chaque particule matérielle sont autant d'éléments très-exactement déterminés.

Occupons-nous d'abord de la direction de la pesanteur.

C'est de haut en bas, c'est-à-dire suivant la verticale du

lieu, que tombent tous les corps; c'est dans le même sens qu'ils pressent les obstacles qui leur servent d'appui. La pesanteur paraît donc agir de l'intérieur de la Terre; et comme, à de petites distances, toutes les verticales semblent parallèles, on pourrait croire qu'au lieu d'une force unique, il en existe une infinité agissant toutes de la même façon. Mais il est facile de voir que cette dernière conclusion n'est pas rigoureuse.

En effet, la pesanteur agit partout de la même manière. Dans tous les lieux, sous toutes les latitudes, à l'équateur, aux pôles, dans les régions moyennes, c'est toujours dans une direction perpendiculaire à l'horizon qu'elle fait sentir son influence. Pour savoir en quel point de l'intérieur de notre globe cette action multiple est concentrée, il faut donc chercher si toutes les verticales ont un réel point de concours.

Prenons un quelconque des méridiens de la sphère qui constitue notre planète. Chaque élément du cercle qui le forme indique un horizon, et la ligne perpendiculaire à cet élément, ou si l'on veut la *verticale* du lieu, n'est autre chose qu'un des rayons de la circonférence, c'est-à-dire une ligne aboutissant au centre même de la sphère. Ainsi, toutes ces verticales telles que AZ, en apparence parallèles lorsque l'on considère les plus voisines, sont en réalité convergentes; elles la dirigent vers le centre C de se Terre (fig. 2).



Fig. 2. — Concours des verticales vers le centre de la Terre.

Ce n'est là qu'une première approximation : la Terre n'étant pas rigoureusement sphérique, mais aplatie aux deux pôles et renflée tout autour de sa circonférence équatoriale, les verticales des diverses latitudes ne concourent pas exactement au même point. Nous verrons même qu'outre cette cause de déviation, il existe des

irrégularités locales qui rendent très-complexe la détermination du véritable centre d'action de la pesanteur. Mais au point de vue qui nous occupe, ces déviations diverses n'ont aucune importance. Enregistrons donc ce premier résultat fondamental :

Tous les corps pesants tendent vers le centre de la Terre. La pesanteur agit sur eux, comme une force unique concentrée en ce point.

C'est une loi qui ne souffre aucune exception. Qu'il s'agisse des corps placés à la surface ou à une hauteur quelconque dans l'atmosphère, ou bien encore à l'intérieur de l'écorce terrestre, dans les puits de mine les plus profonds, toujours l'observation en confirme l'exactitude.

Cette convergence vers un même point de tous les mouvements des corps qui tombent, est en contradiction avec un préjugé populaire encore plus répandu qu'on ne pense. Bien des gens, quand on leur dit que la Terre est ronde et qu'elle est habitée sur tous les points de sa surface, ne peuvent se faire à l'idée qu'on puisse se tenir *les pieds en haut*, *la tête en bas*, et que tous les corps matériels solides ou liquides puissent rester en équilibre à nos antipodes. En y réfléchissant un peu, ils verront bientôt que l'idée de haut et de bas est toute relative, que, sur une sphère libre dans l'espace, chaque élément de la surface est au même titre horizontal, et que la tendance de tous les corps vers le centre de la sphère explique à merveille l'état d'équilibre, en quelque point de la surface qu'ils soient placés.

Mais d'où vient cette force centrale? Est-ce une propriété occulte, indépendante de la matière? La Terre seule jouit elle de cette mystérieuse puissance?

Ces importantes questions restaient encore sans réponse il y a deux siècles. C'est alors que les expériences de Galilée sur la chute des corps graves, les spéculations profondes de Huygens sur les principes de la mécanique permirent au génie de Newton d'identifier la cause qui produit les phénomènes

de pesanteur à la surface de la Terre, avec celle qui, dans l'univers entier, retient tous les astres dans leurs orbites. La pesanteur est un cas particulier de la *Gravitation universelle*. En vertu de cette force, deux molécules quelconques de matière gravitent l'une vers l'autre, c'est-à-dire ont une tendance mutuelle à se réunir, qui dépend de leurs masses respectives et de leur distance. Voici quelle est la loi de cette dépendance :

Si l'on prend pour unité la force qui sollicite l'une vers l'autre deux masses égales situées à l'unité de distance, l'une des masses venant à doubler, la force sera elle-même doublée; si l'autre masse est remplacée par une masse trois fois plus grande, la force sera de nouveau triplée, et par conséquent deviendra six fois plus forte qu'à l'origine.

Si maintenant, les masses restant les mêmes, c'est la distance qui change, devenant, par exemple, deux fois, trois fois, quatre fois moindre, la force de gravitation sera quatre fois, neuf fois, seize fois plus considérable.

Ainsi, l'attraction ou la gravitation — nous emploierons ce dernier terme de préférence, parce qu'il ne suppose rien sur l'essence inconnue de la force — *est proportionnelle au produit des masses, et varie en raison inverse du* carré[1] *de leurs distances.*

Tel est le principe fondamental dont les phénomènes de la pesanteur sont autant de manifestations particulières. Ce n'était pas chose facile que d'en déduire toutes les conséquences, de calculer les actions réciproques de toutes les petites masses composant la masse entière de la Terre, et l'effet résultant de toutes ces actions combinées. Newton, et après lui, les grands géomètres qui ont développé ses idées, d'Alembert, Euler, Maclaurin, Lagrange, Laplace, se sont voués à cette tâche. Ils ont démontré qu'une masse sphé-

1. Le *carré* d'un nombre est, comme on voit, le produit de la multiplication de ce nombre par lui-même : 9 est le carré de 3; 100, le carré de 10; 1 000 000, le carré de 1000, etc.

rique de matière homogène agit sur un point extérieur, de la même façon que si toute la matière était réunie en son centre. Il en est de même d'une couche sphérique homogène, et par conséquent d'une série de couches de même forme, dont la densité irait en croissant suivant une loi quelconque.

Tel est précisément le cas de la Terre; et l'on s'explique alors comment la direction de la pesanteur est partout celle de la verticale à la surface, ou de la ligne qui joint le corps pesant au centre du globe.

Pour un corps situé à l'intérieur, il se trouve attiré par toutes les couches qui se trouvent au-dessous de lui, mais les actions des molécules qui forment les couches extérieures s'entre-détruisent, de sorte que l'intensité de la pesanteur doit aller en diminuant de la surface au centre[1]. Pareillement, cette intensité va diminuant pour les corps extérieurs à sa surface, à mesure que leur distance à la Terre augmente.

Ainsi donc, la source de la pesanteur à la surface de notre globe, est dans la matière tout entière qui le compose. Il n'est pas une seule molécule, si petite soit-elle, qui n'ait sa part dans l'action générale. Disons plus : lorsqu'une pierre tombe, en même temps qu'elle subit l'influence de la masse du globe terrestre, elle-même agit sur ce dernier par sa propre masse : les deux corps se réunissent en gravitant l'un vers l'autre. Seulement, le mouvement de la pierre est seul sensible, sa masse étant pour ainsi dire nulle, comparée à celle de la Terre.

Nous avons dit que la gravitation est universelle. Non-seulement, en effet, elle régit tous les phénomènes de la pesanteur terrestre, mais elle étend son empire jusque dans les

1. En réalité, l'intensité de la pesanteur va d'abord en augmentant, de la surface à une distance du centre qu'on évalue à peu près aux 7 dixièmes du rayon; elle diminue ensuite jusqu'au centre. Ces variations proviennent de ce fait, que les couches concentriques dont notre globe est formé ne sont pas homogènes : leur densité croît de la surface au centre, et la densité des couches superficielles est moindre que les 2/3 de la densité moyenne. Ces résultats ont été déduits des observations du pendule dont nous parlerons plus loin.

profondeurs les plus reculées des cieux. La Lune et la Terre pèsent réciproquement l'une vers l'autre, et leur ensemble gravite vers le Soleil. Toutes les planètes de notre monde solaire agissent continuellement les unes sur les autres, ainsi que sur l'immense sphère qui brille à leur foyer commun. Par son énorme masse, cette dernière les maîtrise toutes dans leurs orbites, de sorte que les mouvements de tous les corps célestes qui composent le système s'altèrent et se balancent mutuellement, sous l'influence de la même force perpétuellement active dans chacune de leurs masses.

Nous avons cherché ailleurs[1] à donner une idée de ces magnifiques problèmes dont la solution est le triomphe de la science. Rappelons seulement ici deux témoignages sensibles de l'existence de la pesanteur dans les espaces célestes. Les marées, ces oscillations périodiques de la mer, sont produites par l'action des masses de la Lune et du Soleil; et les aérolithes, ces corps célestes en miniature qui viennent parfois heurter notre planète, montrent que l'action de la pesanteur terrestre est capable de détourner des masses extérieures de leurs orbites.

Les recherches les plus récentes en astronomie stellaire prouvent enfin que la même force préside aux mouvements des astres les plus éloignés de nous. Les étoiles doubles sont des systèmes de soleils, situés à de prodigieuses distances de notre monde et tournant les uns autour des autres : eh bien, là encore, il paraît certain que leurs mouvements réciproques s'effectuent suivant les lois mêmes qui président à ceux des planètes, lois qui sont une conséquence directe de la gravitation, c'est-à-dire de la pesanteur.

1. *Le Ciel*, notions d'astronomie à l'usage des gens du monde et de la jeunesse.

CHAPITRE II.

LOIS DE LA PESANTEUR.

§ I. LA CHUTE DES CORPS. — ÉGALITÉ DE VITESSE DES CORPS QUI TOMBENT DANS LE VIDE.

On n'avait fait, avant Galilée, aucune expérience précise sur la chute des corps pesants abandonnés à eux-mêmes, dans l'air ou dans les autres milieux. Aussi, comme on voyait certains corps lourds, tels que les métaux, tomber sensiblement plus vite que les corps plus légers, on croyait, sur la foi d'Aristote, que la vitesse de chute, pour des corps tombant d'une même hauteur, est proportionnelle aux poids des corps et à la nature de leur substance. Les expériences faites par Galilée, du haut de la fameuse tour penchée de Pise, détruisirent cette erreur que bien des personnes partagent peut-être encore aujourd'hui. Il laissa tomber du sommet de la tour des boules de divers métaux, d'or, de cuivre, de plomb, qui avaient le même volume, mais des poids inégaux, et il constata que les unes et les autres touchèrent le sol à peu près au même instant; seule, une boule de cire subit un retard marqué. Mais les différences dans les temps de chute n'étaient pas assez fortes pour être attribuées à l'inégalité des poids, de sorte qu'il s'en fallait de beaucoup qu'un corps deux fois plus lourd tombât deux fois plus vite. Il fit les mêmes expériences dans l'air et dans l'eau; il constata alors que les différences de durée des chutes respectives des boules répondaient à la diverse densité des milieux, et non à l'inégalité de masse des mobiles. Galilée



Fig. 3. — Tour penchée de Pise, où Galilée fit ses premières expériences sur la chute des corps graves.

conclut de là que c'est la résistance de l'air qui était la véritable cause des différences observées.

Quand un corps tombe dans l'air, ou dans tout autre milieu, il faut, à chaque instant, qu'il déplace les molécules dont ce milieu est composé, ce qui ne peut se faire sans qu'il leur communique une partie de son propre mouvement. Lors donc, qu'on fait tomber simultanément une balle de plomb et une balle de liége d'égal volume, la résistance de l'air, qui est égale pour les deux surfaces, se répartit entre un plus grand nombre de molécules pesantes dans le plomb que dans le liége : la diminution de vitesse qui en est la conséquence est donc plus forte dans la balle la plus légère. La différence serait plus sensible encore, si la chute, au lieu de s'effectuer dans l'air, se faisait dans un milieu plus dense.

La découverte de Galilée se vérifie aujourd'hui rigoureusement par l'expérience, et c'est à Newton que revient l'honneur de cette vérification.

On prend un long tube de verre muni à ses deux extrémités de deux montures en cuivre, l'une fermant hermétiquement, l'autre terminée par un robinet qui permet d'ajuster le tube sur le plateau d'une machine nommée *machine pneumatique*, propre à enlever d'un vase quelconque l'air qu'il contient. On commence par introduire dans le tube des corps de densité très-variée : de petits morceaux de bois, de métal, de plume, de papier, de liége, etc., qu'on maintient vers l'un des bouts de l'instrument. En renversant brusquement le tube pour lui donner une position verticale, tous les petits corps introduits partent à la fois du sommet et tombent à l'intérieur même, dans la direction de l'axe du cylindre (fig. 4). Si l'on opère le renversement du tube avant l'extraction de l'air, on constate l'inégalité de vitesse connue de tout le monde. Mais si l'on répète l'expérience à plusieurs reprises, en enlevant progressivement l'air du tube, on observe que cette inégalité décroît avec la raréfaction du milieu où s'effectue la chute. Quand le vide est aussi complet que possible, tous les corps de den-

sités diverses viennent à la fois frapper la paroi inférieure de l'appareil.

C'est donc bien la résistance du milieu qui est cause de l'inégalité de vitesse, dans la chute des corps plus ou moins lourds, ou plus ou moins denses. Cette résistance, non-seulement ralentit les mouvements, mais encore produit des déviations dans la direction de la chute des corps légers. Une feuille de papier, abandonnée dans l'air, parcourt une ligne sinueuse souvent très-accidentée avant d'arriver au sol. Prenez une pièce de monnaie, de dix centimes par exemple, et un petit disque de papier de même dimension : laissez-les tomber séparément de la même hauteur, la pièce touchera le sol bien avant le papier. Posez ensuite le disque sur la pièce et laissez-les tomber ensemble; tous deux frapperont le sol au même instant. C'est que le métal, dans ce dernier cas, s'oppose à la résistance de l'air sur la face inférieure de la feuille.



Fig. 4. — Expérience démontrant l'égalité de vitesse des corps qui tombent dans le vide.

Ce que nous venons dire des corps solides s'applique également aux liquides et aux gaz. Une masse d'eau se divise, dans sa chute, en une multitude de gouttelettes pulvérulentes, dont la formation est due à la résistance de l'air et à la mobilité des molécules du liquide. Cette division est très-sensible dans les jets d'eau, dans les cascades ou nappes d'eau naturelles qui tombent d'une grande hauteur. Mais si l'on se sert, pour faire l'expérience de la chute des corps liquides, d'un tube où l'on a fait le vide, l'eau retombe en bloc sur la paroi inférieure, en conservant la forme cylindrique du vase, et sa chute produit un bruit sec, comme ferait un corps solide. C'est ce qu'on nomme l'expérience du *marteau d'eau.*

La fumée, enfermée dans un tube pareil, se précipite quand on y fait le vide, et l'on voit déjà par cet exemple que les corps gazeux sont aussi pesants.

Disons, en passant, que la résistance de l'air à la chute des corps est un phénomène fort heureux pour l'agriculture, qui ne souffre déjà que trop des ravages produits par la grêle. Sans cette résistance, les gouttes de pluie les plus petites, tombant de la hauteur des nuages avec une vitesse croissante, viendraient frapper la surface du sol avec une grande force, et pourraient causer de grands dommages.

Voilà donc un premier point acquis et une première loi de la pesanteur démontrée :

Tous les corps situés à la surface de la Terre, quels que soient leurs volumes et leurs masses, tombent dans le vide avec une égale vitesse.

On en tire immédiatement cette importante conséquence, que la force de la pesanteur agit avec une égale énergie, sur une parcelle quelconque de matière, absolument comme si chacune des molécules qui composent un corps était [illegible] et indépendante.

Il ne faut pas confondre la pesanteur avec le poids. L'expérience vient de nous montrer que la pesanteur [illegible] de la même manière sur tous les corps, quels que [illegible] volumes et la nature de la [illegible] que le *poids* d'un corps est la somme de [illegible] de la pesanteur, et varie par [illegible] pour des corps homogènes [illegible] ne change pas, avec la [illegible] sée dans des substances différentes.

§ [illegible]

La direction de la pesanteur. — [illegible] peut vérifier approximativement — [illegible]

la Terre, celle de la verticale, ou d'une ligne droite perpendiculaire au plan de l'horizon. Ce plan est lui-même déterminé par la surface des eaux tranquilles. Un moyen pratique fort simple de s'en assurer est d'observer la position que prend un fil flexible tendu par une masse pesante, quand ce fil, après quelques oscillations, s'est mis en équilibre. C'est l'instrument



Fig. 5. — La direction de la pesanteur est perpendiculaire à la surface des liquides en repos.

qu'on nomme *fil à plomb*, dont se servent tous les ouvriers qui veulent établir verticalement une construction quelconque. En plaçant le fil à plomb au-dessus d'une masse liquide en repos, par exemple d'un bain de mercure, on s'assure aisément que la direction du fil et celle de son image sont sur une même ligne droite (fig. 5), et par conséquent, en vertu des lois de la réflexion de la lumière, perpendiculaires toutes deux à la surface plane du liquide.

Les différentes verticales, nous l'avons dit aussi, ne sont pas parallèles ; mais, à de faibles distances, l'angle qu'elles forment est si petit qu'il échappe presque à la mesure. Ainsi, en moyenne, les verticales de deux points dont la distance est de 31 mètres ne font qu'un angle d'une seconde (1″), angle que les astronomes ou les géodésistes ne parviennent à mesurer qu'à l'aide des instruments les plus parfaits. Pour des lieux de la Terre de plus en plus éloignés l'un de l'autre, l'angle des verticales prend toutes les valeurs comprises entre 0° et 180°. Si les deux pays sont sur un même méridien, c'est-à-dire ont même longitude géographique, cet angle se mesure par la différence de latitude. On trouve ainsi 2° 12′ environ entre les directions de la pesanteur à Paris et à Dunkerque. La verticale qui passe au sommet de la lanterne du Panthéon, et celle qui aboutit à la boule de la flèche de Saint-Denis ne font entre elles que le très-petit angle, d'ailleurs fort appréciable, de 5′ 22″ environ[1]. De là il résulte que les eaux d'un lac ou celles de la mer se terminent par une surface qui n'est pas plane, mais sphérique ou plutôt sphéroïdale, bien qu'en chaque point elle se confonde avec le plan de l'horizon du lieu. On voit donc ce qu'il faut entendre quand on dit que les corps pesants tombent suivant une direction constante, qui est celle de la verticale. Cette constance n'implique le parallélisme de la chute que pour des lieux très-voisins.

Enfin, ajoutons que le mouvement de rotation de la Terre produit une déviation dans la chute des corps. Un point *a*, situé à une certaine hauteur dans l'air, tomberait au pied de la

1. Si l'expérience est faite dans le [illegible] à plomb dévie de la [illegible] la montagne. Cette [illegible] mesurée par Bouguer et [illegible] Maskelyne mesura l'influence [illegible] égale à 12″ environ [illegible] par la différence de [illegible] secondes plus grand.

verticale en A, si la Terre était immobile (fig. 6). Mais, pendant la durée de sa chute, le mouvement de rotation lui eût fait décrire un arc *aa'*, plus grand que l'arc AA, décrit par le pied de la verticale. Abandonné à lui-même, il conserve sa vitesse d'impulsion primitive et doit tomber en A', à l'orient du point inférieur. Telle est la déviation qu'indique la théorie, et qui, nulle aux pôles où la vitesse de rotation est nulle, va en croissant jusqu'à l'équateur où cette vitesse atteint son maximum. L'expérience confirme le raisonnement; dans l'atmosphère, il est difficile de fa ire cette vérification, à cause des agi ations de l'air; mais on a pu constater qu'une boule métal-

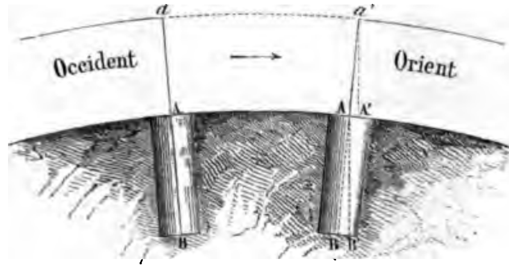


Fig. 6. — Déviation orientale dans la chute des corps.

lique A, abandonnée à elle-même à l'orifice d'un puits très-profond, tombe en B', un peu à l'orient du pied B d'un fil à plomb qui marque la verticale. La déviation dépend de la profondeur du puits; elle serait à l'équateur de 33 millimètres pour un puits de cent mètres de profondeur. Dans les puits de mine de Freiberg (Saxe), M. Reich a constaté une déviation orientale de 28 millimètres, pour une profondeur de 158^{m} 5 ; la théorie indiquait 26^{mm} 6. Il est évident que c'est là une preuve expérimentale du mouvement de rotation de la Terre.

§ III. CHUTE DES CORPS. — LOIS DE GALILÉE.

Galilée, dans ses expériences sur la chute des corps pesants, ne se borna point à détruire le préjugé qui régnait

encore, à son époque, sur l'inégalité de vitesse attribuée à la différence de poids ou de densité des substances. Il observa que la vitesse acquise va en augmentant avec les hauteurs de chute, que les espaces parcourus ne sont pas simplement proportionnels aux temps employés à les parcourir, ou, si l'on veut, que le mouvement des corps graves, au lieu d'être uniforme, est un mouvement accéléré. Ces remarques, sans aucun doute, avaient été faites avant lui, mais il eut la gloire de découvrir la loi précise de la variation des vitesses et des espaces. Supposant que la cause, quelle qu'elle soit, de la pesanteur, agit avec la même force à tout instant, il en conclut que les vitesses acquises devaient être proportionnelles aux temps, et il vérifia cette hypothèse par une expérience célèbre, à laquelle son nom est resté attaché. C'est celle du *Plan incliné de Galilée.*

La rapidité avec laquelle les corps lourds, des balles métalliques par exemple, se précipitent dans leur chute, ne permettait pas aisément l'observation directe. Mais Galilée savait qu'un corps pesant abandonné à lui-même sur un plan incliné à l'horizon et soumis à la seule action de la pesanteur, suit dans son mouvement les mêmes lois que s'il tombait verticalement, abstraction faite, dans les deux cas, du frottement du corps sur le plan et de la résistance de l'air pendant la chute. La force qui entraîne le corps sur le plan incliné n'est autre que la pesanteur, diminuée dans le rapport des deux lignes AC et BC qui mesurent sa hauteur et sa longueur. Par exemple, dans le cas de la figure 7, l'énergie de la pesanteur est réduite à un peu plus du quart de sa valeur naturelle. Le mouvement se trouvant considérablement ralenti par cet artifice, Galilée put aisément mesurer les espaces parcourus pendant les secondes successives de la chute. L'appareil dont il s'est servi pour ses

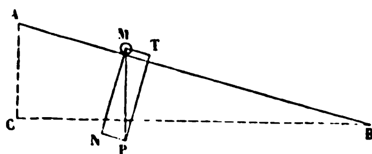


Fig. 7. — Mouvement des corps pesants sur un plan incliné.

expériences consistait en une corde bien glissante, tendue par un poids, — c'était là son plan incliné, — et en un petit chariot formé de deux poulies maintenues elles-mêmes par un corps pesant suspendu à leur système.

Mais l'expérience du plan incliné ne donnant pas des résultats d'une grande précision, on vérifie aujourd'hui les lois de la chute des corps au moyen de divers appareils qui se trouvent dans tous les cabinets de physique et que nous allons décrire. Dès le dix-septième siècle, Riccioli et Grimaldi s'étaient assurés de l'exactitude des expériences de Galilée; mais ils s'étaient bornés, pour cela, à faire tomber des poids du haut de tours inégalement élevées, et à mesurer les temps de leurs chutes par les oscillations du pendule. En 1699, le P. Sébastien imagina aussi une machine ayant pour objet la même vérification. Enfin, un physicien anglais Atwood construisit la machine qui porte son nom; et de nos jours, M. le général Morin en a inventé une autre qui enregistre directement les résultats de l'expérience. Ce sont ces deux appareils que nous allons mettre sous les yeux du lecteur.

L'artifice imaginé par Atwood, pour ralentir le mouvement des corps qui tombent, est celui-ci : un fil de soie très-fin s'enroule autour de la gorge d'une poulie très-mobile (fig. 8), et porte à ses deux extrémités deux cylindres métalliques ayant rigoureusement le même poids. En cet état, la poulie, le fil et les poids restent immobiles, parce que les deux poids égaux se font constamment équilibre. Si l'on charge alors l'un des corps pesants d'un poids additionnel, le système se mettra en mouvement; les deux portions du fil se mouvront en sens inverse en conservant chacune leur direction verticale. Mais on conçoit que la vitesse de la chute sera d'autant plus ralentie que la masse du poids additionnel sera une fraction plus faible de la somme des deux poids égaux. Supposons que chacun de ceux-ci pèse 12 grammes, et le poids additionnel, 1 gramme seulement. Le poids total de 25 grammes étant mis en mouve-

ment par une force qui n'en est que la vingt-cinquième partie, on démontre que la vitesse sera ralentie de la même manière que si l'intensité de la pesanteur était 25 fois moindre. L'observation est ainsi rendue facile, sans que les lois du mouvement soient changées.

La figure 9 montre quelle est la disposition de la machine. A la partie supérieure d'une colonne, on voit la poulie mobile, dont l'axe repose entre les circonférences de deux sys-



Fig. 8. — Poulie de la machine d'Atwood.

tèmes de roues parallèles; puis le fil qui s'enroule sur sa gorge et dont les deux portions sont tendues par les poids égaux. Une règle verticale, divisée avec soin, est disposée derrière l'un des poids et permet de lire, à chacune de ses positions, la distance de sa base au zéro de l'échelle, c'est-à-dire au point de départ du mouvement.

Cette règle porte deux curseurs mobiles, qu'on peut fixer par des vis de pression à l'une quelconque de ses divisions. Le curseur inférieur C est plein, et par conséquent permet d'ar-

rêter à volonté le mouvement du système. L'autre curseur C' est de forme annulaire, et l'ouverture a des dimensions telles qu'elle laisse passer le poids suspendu au fil avec le poids additionnel p', mais au contraire arrête le poids additionnel p à cause de sa forme allongée. Une pendule battant les secondes est jointe à l'appareil : chaque mouvement de l'aiguille fait entendre un bruit net et sec, grâce auquel on peut compter les secondes écoulées, sans observer le cadran. Un mécanisme dépendant de l'horloge permet en outre de commencer chaque expérience, au moment précis où l'aiguille des secondes se trouve occuper le zéro du cadran, à la partie supérieure de ce dernier. Le poids additionnel, d'abord soutenu au-dessus du poids qui occupe la division 0 de l'échelle verticale, est abandonné brusquement grâce à l'action du mécanisme, et le mouvement commence.

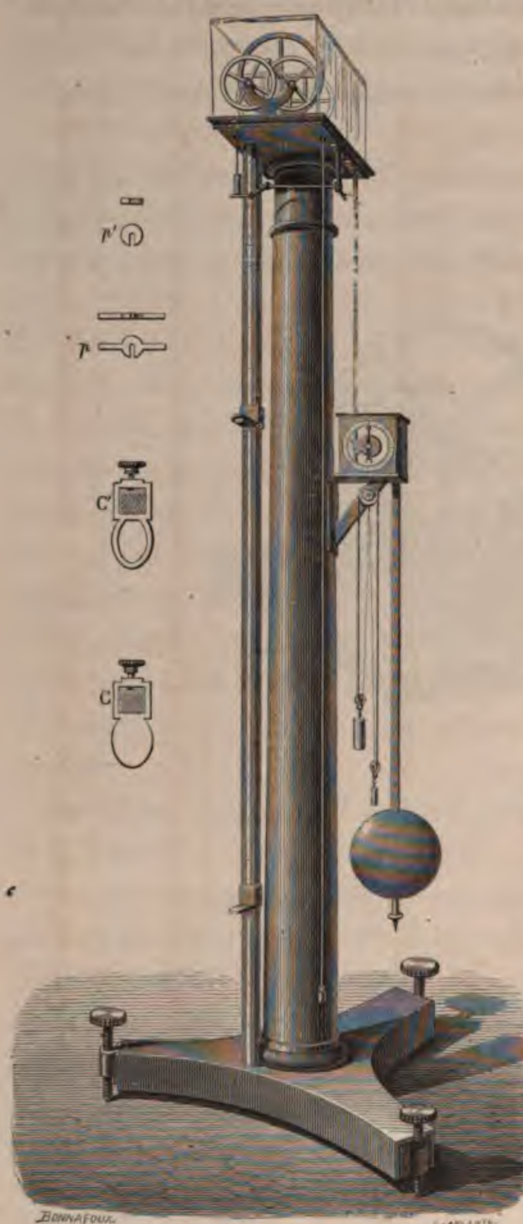


Fig. 9. — Étude expérimentale des lois de la chute des corps. Machine d'Atwood.

Voici maintenant comment on fait l'expérience. Par tâtonnement on place le curseur plein, de manière que le poids cylindrique surmonté du poids p', vienne le toucher précisément au commencement de la deuxième seconde, ce qu'on reconnaît à la coïncidence du second battement de la pendule avec le choc du poids sur le curseur : soit à la douzième division de la règle (fig. 10). Si la chute dure deux secondes entières, le poids tombe sur le curseur placé à la division 48. On reconnaît alors, en recommençant successivement l'opération pendant 3 secondes, 4 secondes, 5 secondes.... etc., que le curseur plein doit être placé aux divisions 108, 192, 300.... etc., pour que le choc du poids coïncide à chaque fois avec le battement des secondes de l'horloge.

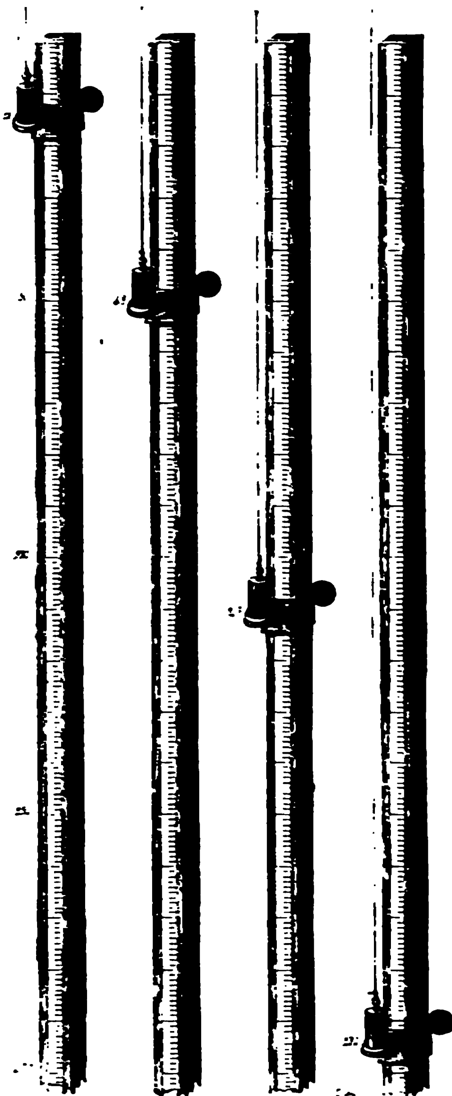


Fig. 10. — Étude expérimentale de la chute des corps. Loi des espaces parcourus.

Ainsi les espaces parcourus sont :

Après 1 seconde.........	12 centimètres;			
— 2 —	48	ou	12×4	
— 3 —	108	ou	12×9	
— 4 —	192	ou	12×16	
— 5 —	300	ou	12×25 etc.	

On le voit : il faut multiplier l'espace que parcourt un corps tombant pendant une seconde, par les nombres 4, 9, 16, 25, pour obtenir les espaces parcourus pendant 2, 3, 4, 5 secondes de chute. Si le poids additionnel changeait, les nombres qui mesurent les espaces changeraient : leurs rapports resteraient les mêmes.

Voilà donc une première loi, et c'est celle qu'avait trouvée Galilée par ses expériences du plan incliné :

Les espaces parcourus par les corps, tombant librement sous l'action de la pesanteur, sont proportionnels aux carrés des temps écoulés depuis l'origine de la chute.

Il reste à trouver la loi des vitesses, c'est-à-dire à savoir quelle est la vitesse acquise après 1, 2, 3, etc., secondes de chute. Tant que le corps qui tombe reste soumis à l'action de la pesanteur, cette vitesse s'accroît sans cesse à chaque instant de la durée, et par conséquent ne peut s'observer. Il faut, pour que cette observation soit possible, que l'action incessante de la pesanteur soit supprimée au moment même où commence la seconde suivante, et que le corps continue à se mouvoir, mais alors uniformément et en vertu de la seule vitesse acquise.

Il importe de se bien pénétrer de ce qu'on entend par vitesse d'un corps qui tombe, ou en général qui est entraîné par un mouvement accéléré. Cette vitesse, à un moment donné du mouvement, est l'espace que parcourrait le corps uniformément, dans chacune des secondes suivantes, si l'action de la force cessait de se produire et dès lors le mouvement de s'accélérer. Le curseur annulaire de la machine d'Atwood permet de réaliser cette hypothèse. Il suffit de le fixer aux divisions que la première expérience a indiquées, puis de chercher par tâtonnements à quels endroits de la règle il faut successivement placer le curseur plein, pour que le poids, débarrassé de son poids additionnel, vienne le frapper au début de la seconde suivante.

L'expérience, en supposant que p ait la même masse que

p', donnera les nombres suivants : 36, 96, 180, etc. (*Voy.* la figure 11). Il résulte de là que la vitesse uniforme du corps grave, acquise après 1, 2, 3, etc., secondes de chute, est :

Après 1 seconde...	de 24 centimètres;	
— 2 —	48	—
— 3 —	72	— etc.

La vitesse va en augmentant proportionnellement aux temps; la seconde loi qui régit la chute des corps graves s'énoncera donc ainsi :

Quand un corps tombe librement sous l'action de la pesanteur, sa vitesse s'accélère; elle est, à un moment quelconque de la chute, proportionnelle au temps écoulé depuis l'origine du mouvement.

Il résulte aussi des mêmes expériences que la vitesse acquise après une seconde de chute est double de l'espace parcouru pendant la première seconde; et il est aisé de voir que cette conséquence est indépendante de l'unité de temps choisie.



Fig. 11. — Étude expérimentale de la chute des corps. Loi des vitesses.

Les mêmes lois se vérifient encore expérimentalement au moyen d'une machine dite à *indications continues*, dont l'idée première est due à M. Poncelet, et qui a été réalisée et construite par M. Morin. La figure 12 en représente une vue d'ensemble. Un poids de forme cylindro-conique descend librement le long de

deux tringles verticales; il est muni d'un crayon qui trace un trait continu sur une colonne recouverte d'une feuille de papier.

Si la colonne était immobile, le trait marqué par le poids dans sa chute serait une ligne droite verticale, qui n'indiquerait rien sur les espaces parcourus pendant les secondes successives. Mais la colonne cylindrique tourne uniformément autour de son axe, à l'aide d'un système de roues dentées mues par la descente d'un poids, et l'uniformité de la rotation est produite par un régulateur à palettes dont l'axe s'engrène avec les roues du système. Grâce à ce mouvement du cylindre

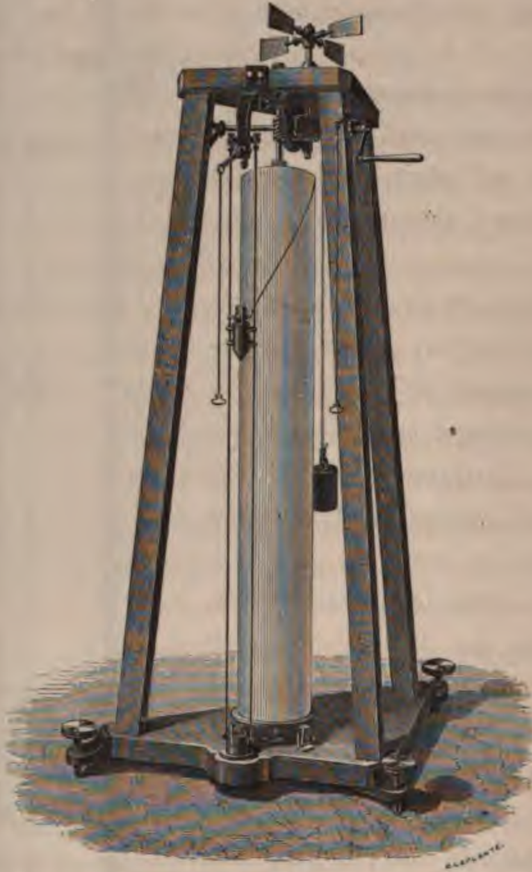


Fig. 12. — Étude expérimentale de la chute des corps. Machine de M. Morin.

et par suite du papier qui le recouvre, le crayon trace une courbe sur le papier, et c'est l'étude de cette courbe qui démontre la loi des espaces parcourus par le corps dans sa chute.

Or, en déroulant le papier, on trouve que la ligne tracée par le crayon est ce qu'on nomme en géométrie une *parabole*, dont la propriété fondamentale est celle-ci :

Les distances de ses points successifs à une perpendiculaire à l'axe, menée par son sommet, sont proportionnelles aux carrés des distances de ces mêmes points à l'axe lui-même. La perpendiculaire à l'axe étant partagée en 5 parties égales, les 5 distances du sommet O aux points de division, 1, 2, 3, 4, 5, seront dans le rapport des nombres 1, 2, 3, 4 et 5; mais les cinq verticales parallèles seront dans le rapport des nombres 1, 4, 9, 16 et 25, c'est-à-dire proportionnelles aux carrés des premiers nombres.

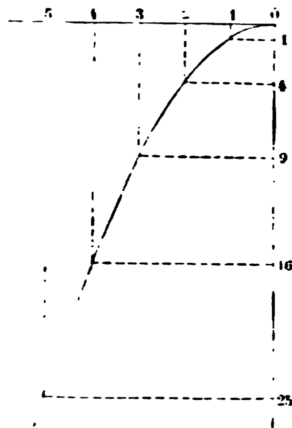


Fig. 13. — Parabole décrite par le poids dans sa chute.

Or, le cylindre ayant tourné uniformément, les portions égales de circonférence qui séparent les points de division de la ligne horizontale, marquent les temps successifs de chute du poids de l'appareil, et les lignes verticales sont les espaces parcourus. La loi des espaces se trouve ainsi vérifiée. Quant à la loi des vitesses, on démontre qu'elle est une conséquence directe de celle des espaces.

Il ne faudrait pas croire que les machines que nous venons de décrire donnent des résultats d'une exactitude mathématique. Il y a des causes de trouble, le frottement des pièces, la résistance de l'air, qui s'y opposent; mais les différences qui en résultent sont assez faibles, pour qu'on puisse conclure de l'expérience approchée à la rigueur de la théorie.

Les expériences faites au moyen de la machine d'Atwood

permettent encore de démontrer que la pesanteur agit sur le corps qui tombe d'une façon continue et constante. En effet, les espaces parcourus pendant les secondes successives peuvent se représenter par les nombres impairs 1, 3, 5 7, 9, etc.... Et comme les vitesses acquises, à partir de la deuxième seconde sont 2, 4, 6, 8, 10, etc., on voit qu'il y a entre les nombres des deux séries une différence constante égale précisément à l'espace parcouru pendant la première seconde. Cette différence marque l'action continue de la pesanteur qui, ajoutée à la vitesse acquise, produit les effets observés.

On fait voir encore que si un corps est lancé verticalement, la hauteur à laquelle il monte dépend de la grandeur de la force qui lui a donné le mouvement; de plus, sa vitesse est décroissante, et lorsqu'il redescend sous l'action de la pesanteur, sa vitesse croissante est, à chaque point de sa route, précisément égale à celle qu'il avait en ce même point, pendant son ascension.

Les expériences faites à l'aide du plan incliné de Galilée et de la machine d'Atwood sont fondées sur une diminution artificielle de l'intensité de la pesanteur, qui ralentit le mouvement des corps graves, sans changer les lois de leur chute. Mais précisément à cause de cela, elles ne permettent pas de mesurer l'espace réel parcouru pendant une seconde de chute; et d'ailleurs, c'est dans le vide qu'il faudrait expérimenter. La machine de M. Morin donnerait cet espace, mais altéré par le frottement et la résistance de l'air. On verra plus loin que le nombre dont nous parlons a été déterminé par une méthode plus précise.

L'intensité de la pesanteur n'est pas d'ailleurs rigoureusement constante: elle varie d'un lieu de la Terre à l'autre, suivant les latitudes et même suivant les configurations locales de l'écorce terrestre. Enfin, dans le même lieu, cette intensité serait-elle même variable si l'on s'élevait à une grande hauteur au-dessus du sol, ou si l'on pénétrait profondément dans l'intérieur de la Terre.

Il faut donc se rappeler que les nombres suivants sont relatifs à la chute des corps, telle qu'elle aurait lieu, à Paris, dans un espace vide d'air, et à peu de distance du sol.

Dans ces circonstances, un corps parcourrait dans la première seconde de sa chute $4^{m},9047$. La vitesse acquise après une seconde est donc $9^{m},8094$; c'est ce dernier nombre qui sert de mesure à l'intensité de la pesanteur.

					m.
Après	2	secondes il serait tombé	d'une	hauteur de	19,619
—	3	—	—	—	44,142
—	4	—	—	—	78,475
—	5	—	—	—	122,618

On peut de même calculer le temps qu'un corps mettrait à tomber d'une hauteur donnée, et la vitesse acquise au moment où il toucherait le sol.

Le tableau suivant indique ces divers éléments :

Hauteur de chute	Temps de chute	Vitesse acquise
Mètres	Secondes	Mètres
1	0,45	4,429
2	0,64	6,264
3	0,78	7,672
4	0,90	8;858
5	1,01	9,904
10	1,43	14,006
100	4,51	44,293

Il résulte de là que, pour lancer un corps à une hauteur verticale de 100 mètres, il faudrait lui donner une vitesse d'impulsion de bas en haut, de $44^{m},293$. Ce corps mettrait alors, pour faire son ascension, un peu plus de 4 secondes 1/2, et il redescendrait dans le même temps.

Répétons encore, pour que le lecteur ne se laisse point aller à considérer les nombres transcrits plus haut comme ayant une exactitude vérifiable dans la pratique, que la résistance de l'air est un élément qui influe beaucoup sur les mouvements des corps qui s'élèvent ou qui tombent, et qu'alors le rapport de leur poids à la surface qu'ils offrent

à cette résistance fait varier les résultats. Rappelons les expériences faites par un physicien du dix-huitième siècle, Désaguliers, en présence de Newton, de Halley, Derham et divers autres savants. Ayant laissé tomber de la lanterne qui surmonte la coupole de Saint-Paul de Londres, différents corps tels que des sphères de plomb de 2 pouces ($0^m,054$) de diamètre et des sphères formées de vessies pleines d'air de 5 pouces ($0^m,135$) de diamètre, le plomb mit 4 secondes 1/2 à parcourir les 272 pieds ($88^m,35$) qui mesurent la hauteur de l'édifice au-dessus du sol : les vessies mirent 18 secondes 1/2. Or, dans le vide, le même espace eût été parcouru en 4 secondes 1/4.

La résistance de l'air allant en croissant avec la vitesse de chute, il en résulte que des corps qui tombent d'une très-grande hauteur, après avoir acquis une certaine vitesse, finissent par descendre d'un mouvement uniforme. On a calculé qu'une goutte d'eau dont le volume serait la 500 000 000e partie d'un centimètre cube tomberait dans l'air parfaitement calme avec une vitesse constante de 127 millimètres par seconde, de sorte qu'en une minute elle ne parcourrait pas plus de $10^m,7$. C'est ainsi que s'explique la faible vitesse relative des gouttes de pluie, malgré la hauteur assez considérable des nuages d'où elles s'échappent.

CHAPITRE III.

LOIS DE LA PESANTEUR. — LE PENDULE.

§ I. ISOCHRONISME DES OSCILLATIONS DU PENDULE. LOIS DES LONGUEURS.

Newton, assis un jour dans son jardin de Woolstrop, vit une pomme se détacher du sommet d'un arbre voisin et tomber à ses pieds. C'est ce fait si familier qui lui suggéra, dit-on, ses recherches profondes sur la nature de la pesanteur, et qui lui fit se demander si cette action mystérieuse, à laquelle sont soumis tous les corps terrestres, quelle que soit leur hauteur dans l'atmosphère, au fond des vallées comme au sommet des plus hautes montagnes, ne s'étendait point jusqu'à la Lune. La solution du problème ne se fit point attendre, grâce aux méditations de ce puissant génie : toutefois ce n'est que vingt années plus tard que fut enfin construit, dans sa majestueuse beauté, l'édifice dont Kepler, Galilée et Huygens avaient préparé les bases, que les successeurs de Newton achevèrent, et qui porte à son frontispice cette formule aujourd'hui triomphante : *gravitation universelle*.

L'anecdote, racontée par les biographes du grand homme, est-elle véridique ? Il importe peu : elle est vraisemblable. Mais on se tromperait si l'on s'imaginait qu'elle fut de nature à diminuer la gloire du savant. De pareils hasards s'étaient présentés des millions de fois avant Newton, à ses ancêtres comme à ses contemporains : un fait aussi banal que la chute d'une pomme ne pouvait susciter de tels problèmes que chez

un esprit rompu aux plus hautes spéculations, et mû par une volonté assez puissante pour *y penser toujours*.

C'est un fait analogue qui servit de point de départ aux recherches de Galilée sur le mouvement du pendule. Il était alors simple étudiant à l'Université de Pise. « Un jour qu'il assistait, peu attentif, il faut le croire, à une cérémonie religieuse dans la cathédrale, ses regards furent frappés par une lampe de bronze, chef-d'œuvre de Benvenuto Cellini, qui, suspendue à une longue corde, oscillait lentement devant l'autel. Peut-être les yeux fixés sur ce métronome improvisé, mêla-t-il sa voix à celle des officiants : la lampe s'arrêta peu à peu, et, attentif à ses derniers mouvements, il reconnut qu'elle battait toujours la même mesure. » (J. Bertrand, *Galilée et ses travaux*.) C'est cette dernière observation qui frappa Galilée. La lampe, à mesure qu'approchait la fin de son mouvement, décrivait dans l'espace des arcs de plus en plus petits, et la durée des oscillations restait la même. En répétant l'expérience, il découvrit le rapport qui existe entre cette durée et la longueur de la corde supportant le poids oscillant. Mais ce n'est que longtemps après, en 1673, qu'Huygens compléta cette belle découverte, et donna la loi mathématique des mouvements du pendule.

Cherchons à faire comprendre quelle est cette loi, et comment elle se rattache à la théorie de la pesanteur.

Concevons un point matériel et pesant M', suspendu à l'une des extrémités d'un fil inextensible et sans pesanteur. Ce sont là des hypothèses irréalisables dans la pratique, mais accessibles à la théorie. Le fil étant fixé par son extrémité supérieure, l'action de la pesanteur sur le point matériel tendra le fil dans l'action de la verticale, et le système tout entier restera en repos. Supposons maintenant qu'on écarte le fil de sa position verticale, sans qu'il cesse d'être en ligne droite, puis, qu'on l'abandonne à lui-même dans un espace vide d'air. Que se passera-t-il alors?

La pesanteur, dans cette position nouvelle en M, continue d'agir sur le point matériel; mais comme cette force est toujours dirigée selon la verticale et qu'il n'en est plus de même du fil, la résistance de celui-ci ne peut la détruire tout entière. Le point matériel, sollicité, tombera donc; mais comme d'autre part le fil est inextensible, la chute ne pourra s'effectuer que le long d'un arc de cercle ayant son centre au point A de suspension et pour rayon la longueur AM du fil. C'est comme si le point se trouvait sur un plan incliné, ayant en M son sommet et d'une inclinaison de plus en plus petite. Le calcul démontre que le mouvement s'effectuera avec une vitesse croissante, jusqu'au moment où le fil sera revenu à sa position verticale; puis, qu'en vertu de sa vitesse acquise, il parcourra un arc égal au premier, mais avec une vitesse décroissante. Arrivé en M", à la hauteur du point M, son mouvement cessera. Il est maintenant aisé de comprendre que le point matériel recommencera, en sens inverse, un mouvement analogue et parfaitement égal au premier, puisque les circonstances seront les mêmes. Ce serait le mouvement perpétuel, si les conditions supposées pouvaient être remplies.

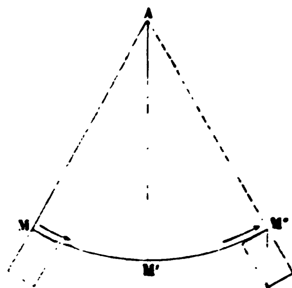


Fig. 14. — Mouvement oscillatoire d'un pendule simple.

L'instrument idéal que nous venons de décrire se nomme le *pendule*. On l'appelle le *pendule simple*, par opposition aux pendules réels, mais *composés*, qu'on peut construire et observer. Le mouvement total de M en M", se nomme une *oscillation*, et sa durée est tout naturellement le temps que met le mobile à parcourir l'oscillation entière.

Il est à peine besoin de dire que la perpétuité des oscillations ou du mouvement du pendule est purement théorique. Dans la réalité, il existe des causes multiples qui peu à peu détruisent le mouvement et finissent par l'arrêter : le corps

suspendu n'est pas un point matériel unique, mais une lentille ou une boule métallique ; la tige est elle-même souvent volumineuse, et la résistance de l'air détruit une partie du mouvement du pendule à chaque oscillation. Ajoutez à ces causes de ralentissement le frottement de la tige ou du couteau sur le plan de suspension.

Néanmoins, on est parvenu à rendre les lois du pendule simple applicables aux oscillations des pendules composés, et à tenir compte des résistances qui proviennent nécessairement de l'imperfection relative des pendules exécutés avec toute la précision possible.

Formulons donc ces lois dont l'importance théorique égale celle de leurs applications, et qui ont fait du pendule l'instrument par excellence pour la mesure du temps, l'indicateur le plus précis des irrégularités du sphéroïde terrestre, et la balance à l'aide de laquelle on a pu peser notre planète et par suite tous les corps du monde solaire.

La première loi est celle que Galilée découvrit par l'observation ; en voici l'énoncé :

La durée des très-petites oscillations d'un même pendule est indépendante de leur amplitude ; elles sont isochrones, c'est-à-dire s'effectuent toutes dans le même temps.

On entend par petites oscillations celles dont l'angle est moindre que quatre degrés. Dans ces limites, les oscillations d'une plus grande amplitude se font dans un temps un peu plus long que les autres ; mais la différence de durée entre les unes et les autres est très-faible, et ce n'est qu'après un grand nombre d'oscillations que les petites différences dont nous parlons, en s'accumulant, deviennent sensibles.

C'est la théorie qui démontre l'isochronisme des oscillations pendulaires. Mais il est aisé de vérifier la loi par l'expérience, en comptant avec soin un nombre considérable d'oscillations, et en mesurant à l'aide d'un bon chronomètre le nombre de secondes écoulées. Une simple division donne

la durée d'une oscillation qu'on trouve être la même, soit au commencement, soit à la fin de l'expérience.

Cette égalité de durée pour des chemins inégaux parcourus sous l'influence d'une force constante, pourrait sembler singulière au premier abord. Mais en y réfléchissant un peu, on comprendra, sans démonstration rigoureuse, que dans le cas d'une amplitude plus grande, le pendule commence par se mouvoir dans une direction moins éloignée de la verticale; la pesanteur lui imprime une plus grande vitesse, à l'aide de laquelle il regagne bientôt l'avance qu'aurait un pendule identique décrivant un arc de moindre amplitude.

La seconde loi qui régit les mouvements du pendule établit un rapport entre les durées des oscillations et les longueurs des pendules.

Imaginons une série de pendules dont le plus petit batte les secondes, et dont les autres effectuent chacune de leurs oscillations en 2, 3, 4.... secondes. Pour qu'il en soit ainsi, les longueurs de ces derniers doivent être 4 fois, 9, 16.... fois plus grandes que la longueur du premier. Les temps suivant la série des nombres simples, les longueurs suivent la série des carrés de ces nombres. C'est ce qu'on exprime d'une manière plus générale, en disant:

Les longueurs des pendules sont en raison inverse des carrés des durées de leurs petites oscillations.

La théorie et l'observation s'accordent pour démontrer cette loi importante. Mais puisque nous parlons des vérifications expérimentales et que nous savons qu'il est impossible de réaliser un *pendule simple*, il est temps de dire de quelle manière les lois de ce pendule idéal s'appliquent aux pendules réels ou *composés*.

Les pendules de ce genre sont ordinairement formés d'une lentille ou d'une boule sphérique en métal et d'une tige ajustée dans la direction du centre de figure de la sphère ou de la lentille. Cette tige vient s'encastrer, à sa partie supérieure, dans un couteau métallique tranchant qui repose par

son arête horizontale sur un plan dur et poli (fig. 15). Tels sont les pendules dont les oscillations donnent le mouvement aux rouages des horloges.

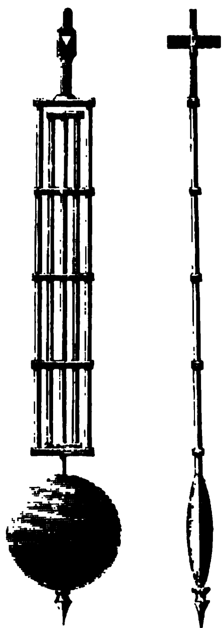


Fig. 15. — Pendule composé.

Dans un pareil système, ce qu'on entend par la longueur du pendule n'est pas la distance du point de suspension à l'extrémité inférieure de la boule pesante; mais, à peu de chose près, la distance entre ce point et le centre de figure de la boule, quand la tige du pendule est déliée et que la boule est une sphère de métal très-dense, par exemple une sphère de platine. Ce dernier point prend alors le nom de *centre d'oscillation*. Voici la raison de cette distinction fondamentale :

Dans le pendule simple, un seul point est matériel. Dans le pendule composé, il y en a une infinité, soit dans la tige, soit dans la boule métallique. C'est comme si l'on avait une suite de pendules simples de longueurs différentes, et assujettis à exécuter d'ensemble toutes leurs oscillations. S'ils étaient libres, les durées des oscillations varieraient de l'un à l'autre, d'après la loi qui lie les longueurs à ces durées. Mais comme ils sont liés ensemble, le mouvement de chaque molécule se trouve accéléré pour les plus éloignées, ralenti pour les plus voisines du point de suspension. Entre les unes et les autres, il en est donc, dont les durées d'oscillations sont précisément celles d'un pendule simple d'égale longueur. Le calcul apprend à trouver la position de ces molécules, c'est-à-dire le point que nous venons d'appeler centre d'oscillation.

§ II. APPLICATION DU PENDULE À LA DÉTERMINATION DE LA FIGURE ET DE LA DENSITÉ DE LA TERRE.

Essayons maintenant de faire comprendre comment on a pu, au moyen des observations du pendule, résoudre d'importantes questions qui intéressent la forme de notre planète et sa constitution physique.

L durées des petites oscillations d'un pendule sont liées à sa longueur par la loi que nous avons plus haut énoncée. Mais ces deux éléments dépendent aussi de l'intensité de la pesanteur, dans le lieu où les oscillations s'effectuent.

Il résulte de là que si l'on compte avec précision le nombre des oscillations qu'un pendule, dont la longueur est elle-même mesurée avec une rigoureuse exactitude, exécute dans un jour sidéral, on pourra calculer la durée précise d'une oscillation, puis en déduire l'intensité même de la pesanteur, c'est-à-dire le double du chemin que parcourt dans une seconde un corps grave tombant dans le vide. Cette intensité est liée, en effet, par un rapport mathématique, à la longueur du pendule et à la durée d'une de ses oscillations.

C'est par cette méthode, qu'on a trouvé le nombre que nous avons donné plus haut, pour la latitude de Paris, et qui est exactement 9^{m},8094. Une fois cette détermination obtenue, on peut obtenir par le calcul la longueur du pendule qui bat les secondes. Cette longueur est, à Paris, de 994 millimètres.

Maintenant, imaginons qu'un observateur se transporte de l'équateur aux pôles. Comme la Terre n'est pas sphérique, la distance de l'observateur à son centre variera. Plus grande à l'équateur, elle diminuera progressivement, passera par une valeur moyenne, et sera la plus petite possible aux pôles mêmes. Or, pour cette raison seule, l'énergie de la pesanteur en ces différents lieux décroîtra des pôles à l'équateur.

Une autre influence contribuera encore à diminuer l'inten-

sité de cette force; c'est la rotation de la Terre, dont la vitesse nulle aux deux pôles, augmente progressivement avec la latitude, en développant en chaque point une force centrifuge qui contre-balance en partie l'action de la gravité terrestre.

Pour ces deux raisons, l'intensité de la pesanteur sera variable aux diverses latitudes. Comment notre observateur s'en apercevra-t-il? Par l'observation des oscillations du pendule, qui fournit deux méthodes différentes, également concluantes.

La première méthode consiste à employer un pendule de longueur invariable, dont la tige et la boule, soudées ensemble sont fixées au couteau d'une manière permanente. Un tel pendule, ayant une longueur constante, ou du moins ne pouvant varier que sous l'action des changements de température, donnera des oscillations d'autant plus rapides que la pesanteur sera plus intense, de sorte qu'en allant des pôles à l'équateur, leur nombre, dans un jour moyen, sera de plus en plus petit. C'est ainsi qu'un pendule d'*un mètre* de longueur qui, à Paris, fait dans le vide 86 137 petites oscillations en 24 heures, transporté aux pôles, en ferait 86 242, et à l'équateur n'exécuterait plus, dans le même temps, que 86 017 oscillations.

L'autre méthode consiste à faire osciller un pendule, à mesurer avec le plus grand soin le nombre de ses oscillations ainsi que sa longueur au moment de l'expérience, puis à en déduire la longueur du pendule simple qui battrait les secondes dans la même station. Les longueurs comparées du pendule à secondes, dans diverses stations, permettent alors de calculer les rapports qui existent entre les intensités de la pesanteur aux mêmes lieux.

On possède un grand nombre d'observations, effectuées par l'une ou l'autre des deux méthodes en des régions très-diverses des deux hémisphères, depuis le dix-septième siècle jusqu'à nos jours. Les savants les plus illustres ont attaché leurs noms à ces travaux d'une si grande importance pour la

physique du globe. Le tableau suivant qui donne en millimètres la longueur du pendule à secondes pour la station de Paris, montre assez d'ailleurs quel accord existe entre les résultats, et quelle précision a présidé à toutes les expériences :

LONGUEUR DU PENDULE BATTANT LES SECONDES A PARIS.

		mm.
D'après	Picard	994,000
—	Richer et Huygens	994.200
—	Godin	993.930
—	Bouguer	994.180
—	Mairan	994,032
—	Whiterurst	993.877
—	Borda	993,896
—	Biot et Mathieu	993.915
—	Kater	993,998
—	Bessel	993.781

Le nombre moyen généralement adopté diffère peu de 994 millimètres.

Nous donnons ici (fig. 16 et 17), la vue du pendule employé par Borda, si connu par la précision de ses recherches : c'est le pendule qui servit aux observations faites à Paris, à Bordeaux et à Dunkerque, par MM. Biot et Mathieu.

Le pendule de Borda était formé d'une boule de platine de 36 mill. 1/2 de diamètre, suspendue par simple adhérence à l'aide d'une calotte métallique enduite d'une couche légère de suif, à un fil également métallique très-fin : ce dernier venait s'attacher, par son extrémité supérieure, à un couteau de suspension pareil à celui qui supporte la verge des horloges. Le couteau reposait sur deux plans fixes, bien polis, de pierre très-dure, dont la position était parfaitement horizontale. Ces plans étaient eux-mêmes enchâssés dans un grand plateau de fer attaché à des supports qu'on avait scellés dans une muraille solide, de manière à obtenir une immobilité parfaite.

Les oscillations étaient comptées par comparaison avec

celles du pendule d'une horloge placée contre la muraille, mais dont on avait eu grand soin de rendre le mode de suspension indépendant de celui du pendule de platine, et dont le mouvement avait été réglé sur les étoiles. On observait à l'aide d'une lunette placée à 10 mètres de distance, les coïncidences successives des deux pendules, et c'estdu nombre des coïncidences et de celui des secondes écoulées qu'on déduisait le nombre des oscillations.

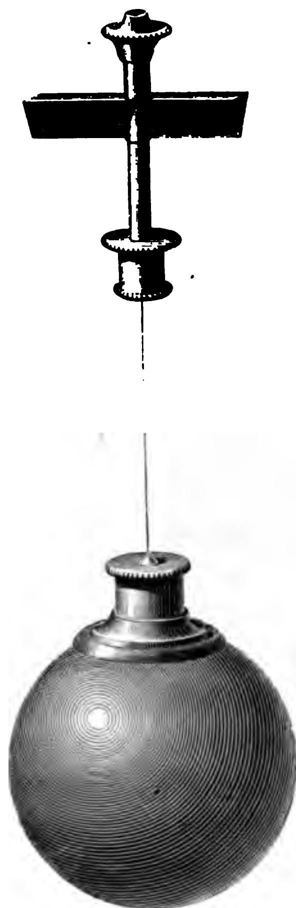


Fig. 16. — Pendule de Borda.

Enfin ce nombre connu, on mesurait la longueur du pendule, par des opérations d'une grande délicatesse, dont le détail ne peut trouver place ici. (V. le t. II de l'*Astronomie physique* de M. Biot.)

Nous venons de donner la longueur du pendule à secondes, pour la station de Paris. Voici celles que le calcul et les observations ont fait trouver pour le même pendule, aux pôles, à l'équateur et à une latitude moyenne de 45 degrés. Nous y joignons les nombres qui mesurent l'intensité de la pesanteur en ces divers lieux, c'est-à-dire le nombre de mètres indiquant la vitesse acquise, après une seconde, par les corps graves tombant dans le vide.

	Longueur du pendule à secondes	Intensité de la pesanteur
	mm.	m.
A l'équateur............	991,03	9,78103
A la latitude de 45°......	993,52	9,80606
Aux pôles..............	996,19	9,83109

Il ne faut pas oublier que les variations de la pesanteur

sur le globe terrestre dépendent, comme nous l'avons dit, et de la forme même de ce globe, laquelle n'est pas sphérique, mais ellipsoïdale, et de la force centrifuge engendrée par la



Fig. 17. — Pendule de Borda. Mesure de la durée d'une oscillation par la méthode des coïncidences.

vitesse de rotation. La pesanteur diminue donc, des pôles à l'équateur, plus qu'elle ne le ferait sans cette rotation. Mais on sait quelle part respective il faut attribuer à chacune de ces deux causes dans les phénomènes. On a donc pu, à l'aide des observations du pendule, calculer l'aplatissement de la

Terre, et vérifier de la sorte les résultats des opérations géodésiques, en même temps que l'hypothèse de Clairaut sur les densités croissantes des couches intérieures de la surface au centre.

En comparant les oscillations pendulaires exécutées dans les différentes régions du globe, on a remarqué qu'elles accusent parfois une intensité attractive plus forte que celle donnée par le calcul : dans d'autres points, cette intensité est au contraire plus faible que ne l'exigerait le niveau elliptique de la Terre. Comme l'excès de pesanteur dont il s'agit a été observé surtout dans des îles situées au large des mers, tandis que les dernières observations étaient faites sur la côte ou dans l'intérieur des continents, on en a conclu que « le niveau des eaux est *surbaissé* au milieu de l'Océan, en sorte qu'il se rapproche plus du centre du globe; et qu'au contraire, ce niveau est *surélevé* dans le voisinage des grandes terres, de manière à s'éloigner de ce centre. » (Saigey, *Physique du globe.*)

Voilà donc le pendule indiquant jusqu'aux inégalités de courbure du sphéroïde terrestre.

En observant les différences de longueur du pendule qui bat les secondes, au sommet d'une très-haute montagne et au niveau de la mer, sous la même latitude, on peut arriver à trouver la densité du globe. Une autre méthode qui a été pareillement employée consiste à observer les oscillations du pendule à la surface du sol et à une certaine profondeur à l'intérieur de la Terre, ou bien encore au niveau de la mer et au sommet d'une haute montagne. Le directeur actuel de l'observatoire de Greenwich, M. Airy, a fait, dans les mines de Harton, des expériences sur les oscillations de deux pendules placés, l'un à la surface du sol, l'autre au fond de la mine, à une profondeur de 384 mètres. Le dernier marchait plus vite que le pendule supérieur, et son avance, de 2 secondes 1/4 en 24 heures, montra que l'intensité de la pesanteur va en augmentant, de la surface de la Terre

au fond de la mine, de la 20 000ᵉ partie de sa valeur environ.

Ce résultat fait voir que la densité des couches terrestres est croissante de la surface au centre; puisque, s'il en était autrement, l'attraction due seulement au noyau intérieur devrait diminuer avec la profondeur, et les oscillations du pendule seraient de plus en plus lentes, ce qui est contraire à l'observation. La densité des couches comprises entre la surface et le fond de la mine étant connue, et le rapport entre cette densité et celle du noyau se déduisant de l'accélération observée, on calcule la densité moyenne du globe terrestre. La même recherche a été faite par d'autres méthodes et a donné des résultats un peu différents, ce qui n'a rien d'étonnant dans un problème aussi délicat. En résumé, on s'accorde à considérer le globe terrestre comme ayant un poids à peu près 5 1/2 aussi considérable que celui d'un égal volume d'eau. Il est aussi prouvé, nous avons eu déjà l'occasion de le dire, que la densité des couches concentriques dont la Terre est formée va en augmentant de la surface au centre. Les physiciens s'accordent à admettre, d'après des considérations qui ne peuvent trouver place ici, pour la densité des couches centrales, un nombre double de la densité moyenne, qui elle-même est à peu près double de la densité des couches superficielles.

CHAPITRE IV.

POIDS DES CORPS.

« De la précision dans les mesures et les poids dépend le perfectionnement de la chimie, de la physique et de la physiologie. La mesure et le poids sont des juges inflexibles placés au-dessus de toutes les opinions qui ne s'appuient que sur des observations imparfaites. »

(J. Moleschott. *La circulation de la vie. — Indestructibilité de la matière.*)

§ I. ÉQUILIBRE DES CORPS PESANTS. — CENTRES DE GRAVITÉ.

La pesanteur agit de la même manière sur tous les corps, quelles que soient leur forme, leur grosseur, la nature de leur substance. Cela résulte de l'égalité de vitesse qu'acquièrent les corps en tombant dans le vide, d'une même hauteur et dans le même lieu. On peut donc considérer un corps pesant quelconque comme une agrégation d'une multitude de molécules matérielles, dont chacune est sollicitée individuellement par la pesanteur (fig. 18).

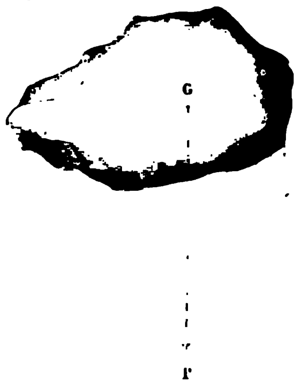


Fig. 18. — Poids d'un corps; centre de gravité.

Toutes ces forces égales agissent parallèlement, et dès lors produisent le même effet qu'une force unique, égale en intensité à leur somme. C'est cette résultante de toutes les ac-

tions de la pesanteur qui est le *poids* du corps. Le point G où elle est appliquée, et qu'on nomme son *centre de gravité*, est le point qu'il faut soutenir, quelle que soit la position du corps, pour que ce dernier reste en équilibre. Le centre de gravité n'est pas toujours situé, d'ailleurs, à l'intérieur du corps même : il peut dans certains cas être placé au dehors.

Nous avons dit plus haut qu'il ne faut pas confondre la pesanteur avec le poids; mais il importe aussi de distinguer le poids de la *masse*. On définit quelquefois la masse en disant que c'est la quantité de matière que renferme un corps; mais cette définition est vague, et ne laisse pas saisir quelle différence peut exister entre le poids et la masse. Un exemple va nous permettre de comprendre le sens précis que la mécanique donne à ce mot.

Prenons un corps pesant, par exemple un morceau de fer. Pour évaluer son poids, suspendons-le à un ressort ou dynamomètre (voyez la fig. 1) dont le degré de tension sera propre à mesurer l'intensité de l'action de la pesanteur sur le corps. Marquons sur l'échelle divisée, le point précis où s'arrête la branche supérieure de l'instrument, et supposons que cette première observation soit faite à la latitude de Paris, par exemple.

Transportons le morceau de fer et le dynamomètre, soit vers l'équateur, soit vers les pôles. L'intensité de la pesanteur n'étant plus la même, le ressort sera moins tendu dans la première hypothèse; il le sera plus dans la seconde. Le poids, comme on devait s'y attendre d'après ce que nous savons des variations de la pesanteur à la surface de la Terre, a donc changé. Et cependant, c'est la même quantité de matière, c'est la même masse qui, dans les trois cas, a servi à l'expérience.

Ainsi donc, la quantité de matière, la masse restar
le poids varie, et dans le même rapport que l'int
pesanteur; de sorte que, ce qu'il y a de co

rapport même, qui pour cette raison sert de définition à la masse.

Cette variation dans le poids des corps, quand on les transporte d'un endroit dans un autre de latitude différente, aurait également lieu si les corps changeaient d'altitude, c'est-à-dire si leur hauteur au-dessus ou au-dessous du niveau de la mer venait à changer, leurs masses restant toujours constantes; mais on ne pourra la constater à l'aide des balances, parce que dans ces instruments on fait équilibre aux corps par des poids égaux, et que la variation s'exercerait à la fois sur le poids à mesurer et sur le poids qui lui sert de mesure. Le calcul montre qu'à Paris un poids de 1 kilogramme ou 1000 grammes ne pèserait plus à l'équateur que 997 gr. 108 : il subirait une diminution de $\frac{1}{346}$. Le même poids transporté au pôle exercerait sur un dynamomètre la même tension qu'un poids de 1000 gr. 221 à Paris : augmentation de moins de $\frac{1}{500}$.

Revenons aux centres de gravité. Il peut être intéressant, et il est, d'ailleurs, souvent utile de connaître la position du point qui, rendu fixe ou soutenu, laisse le corps en équilibre, lorsqu'il n'est soumis qu'à l'action de la pesanteur. Dans le cas où la matière qui le compose est partout homogène, et où sa forme est symétrique ou régulière, la détermination du centre de gravité est pure affaire de géométrie. Passons en revue les plus ordinaires de ces formes.

Une *ligne droite* pesante a son centre de gravité au milieu de sa longueur. En réalité, la ligne matérielle est prismatique ou cylindrique, mais dans le cas où l'épaisseur est très-petite, relativement à la longueur, on peut la négliger sans inconvénient. La même remarque s'applique aux surfaces très-minces, et on les considère comme des figures planes ou courbes sans épaisseur.

Le *carré*, le *rectangle*, le *parallélogramme* ont leurs centres de gravité au concours de leurs diagonales (fig. 19). Le *triangle* l'a au point de concours des lignes qui, de chaque sommet, aboutissent au milieu du côté opposé, c'est-à-dire au

tiers de l'une quelconque de ces lignes à partir de la base. Si ces surfaces étaient réduites à leurs contours extérieurs, la

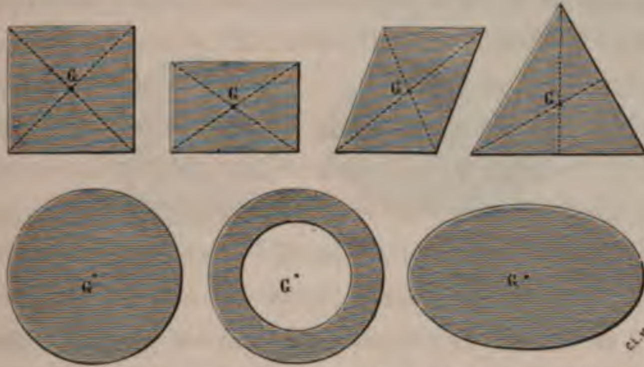


Fig. 19. — Centres de gravité d'un triangle, d'un parallélogramme, d'un cercle, d'un anneau circulaire et d'une ellipse.

position des centres de gravité ne serait point changée. Le centre de figure d'un *cercle*, ou d'un *anneau circulaire*, ou d'une *ellipse*, est en même temps son centre de gravité.

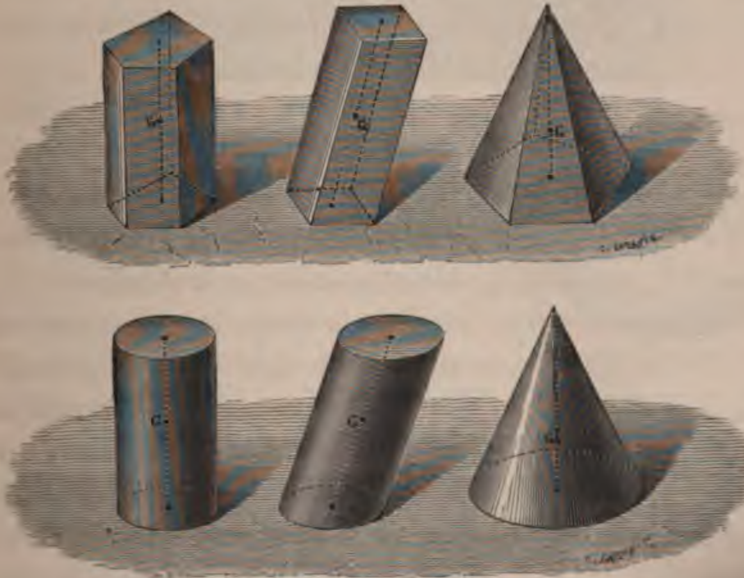


Fig. 20. — Centres de gravité d'un prisme, d'un cylindre, d'une pyramide et d'un cône.

Les *cylindres droits ou obliques*, les *prismes réguliers*, les *parallélépipèdes* (fig. 20) ont leurs centres de gravité au

milieu de leur axe. Celui de la *sphère* ou de l'*ellipsoïde* de révolution est à son centre de figure (fig. 22). Pour avoir celui d'une *pyramide* ou d'un *cône*, droit ou oblique, il faut joindre



Fig. 21. — Centres de gravité d'un ellipsoïde de révolution, d'une sphère.

le sommet au centre de gravité du polygone de base, et prendre le quart de cette ligne à partir de la base.

Voilà pour les corps homogènes de forme géométrique.

Mais, le plus souvent, la forme est quelconque ou irrégulière, ou bien la matière qui compose le corps n'est pas également condensée dans toutes ses parties. Dans ce cas, la détermination du centre de gravité est du ressort de l'expérience.

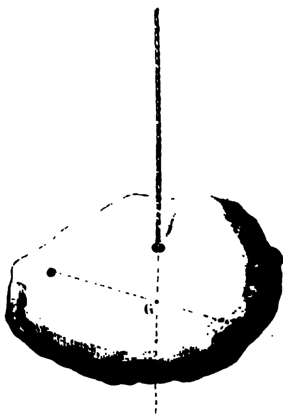


Fig. 22. — Détermination expérimentale du centre de gravité d'un corps de forme irrégulière, ou non homogène.

Un moyen simple de le trouver consiste à suspendre le corps par un fil. Une fois en équilibre, on est assuré que le centre de gravité se trouve sur le prolongement du fil dont la position est alors verticale. On prend note de cette direction. On fait une seconde détermination en suspendant le corps par un autre de ses points, ce qui fournit une nouvelle ligne contenant le centre de gravité. Le point de concours des deux lignes donne donc ce centre lui-même (fig. 22) qui peut être tantôt à l'intérieur, tantôt à l'extérieur du corps pesant.

La définition du centre de gravité fait voir que lorsque ce point est soutenu ou rendu fixe, pourvu qu'il soit invariable-

ment lié à tous les points matériels dont le corps se compose, l'équilibre a lieu. Mais cette condition est difficile à remplir, puisque, le plus souvent, le centre de gravité est un point intérieur, par lequel le corps ne peut être immédiatement soutenu ou suspendu.

Si la suspension a lieu par un fil ou une corde flexible, l'équilibre s'établira de lui-même, le centre de gravité venant alors se placer sur la verticale passant par le point de suspension. Si, cette position obtenue, on vient à déranger le corps, il formera un pendule composé, exécutera un certain nombre d'oscillations autour de sa position et reviendra au repos.



Fig. 23. — Équilibre d'un corps reposant sur un plan par une face plane ou un seul point.

C'est ce qu'on appelle un *équilibre stable*, et l'on voit que ce genre d'équilibre a pour condition essentielle que la position du centre de gravité soit inférieure au point fixe de suspension, de sorte qu'en dérangeant le corps, le centre de gravité monte.

En général, pour qu'un corps pesant soit en équilibre sous l'action de la pesanteur, il faut et il suffit que son centre de gravité soit sur une verticale, passant par le point d'appui si ce point est unique, ou à l'intérieur du plan d'appui si les points fixes sont plus ou moins nombreux. L
et 24 en donnent plusieurs exemples. Les tour
Bologne et de Pise (la figure 3 représente le s
édifices) sont des cas singuliers d'équilibre,

circonstance, que le centre de gravité de l'édifice est sur une verticale tombant en un point intérieur à la base. Mais on comprend que les matériaux dont ces tours sont composées sont liés ensemble, de manière que chacun d'eux



Fig. 24. — Équilibre d'un corps reposant sur un plan par trois points.

ne peut obéir séparément à la force qui entraînerait leur chute.

Ce porteur d'eau, ce fort de la halle que représente la figure 25, prennent des positions inclinées par côté ou en avant,



Fig. 25. — Positions d'équilibre des personnes chargées d'un fardeau.

et te les, que le centre de gravité de l'ensemble de leur corps et du fardeau qu'il soutient reste sur une verticale tombant à l'intérieur de la base formée par les pieds du porteur. Il en est de même de cette voiture (fig. 26) qui roule sur un chemin

incliné transversalement : elle reste en équilibre, tant que le centre de gravité reste verticalement au-dessus de la base comprise entre les points où les roues touchent le sol. Elle versera, si le contraire arrive, soit par le fait de l'inclinaison



Fig. 26. — Équilibre sur un plan incliné.

trop forte de la route, soit par le mouvement qu'imprime au véhicule et à son centre de gravité une vitesse trop rapide.

Quand le corps est soutenu par un axe horizontal autour duquel il peut tourner librement, l'équilibre peut être *stable*,



Fig. 27. — Équilibre instable, indifférent et stable.

indifférent ou *instable*. Il est stable, si le centre de gravité est au-dessous de l'axe ; indifférent, si ce centre est sur l'axe lui-même ; enfin il est instable, si le centre de gravité est au-dessous de l'axe. La figure 27 donne un exemple de chacun de ces cas.

§ II. MESURE DU POIDS DES CORPS. — LA BALANCE.

Déterminer le centre de gravité d'un corps ou d'un assemblage de corps pesants est un problème qui trouve fréquemment, dans les arts et dans les industries diverses, une multitude d'applications. Mais une autre question non moins intéressante et non moins utile est celle qui a pour objet de mesurer la résultante dont le centre de gravité est le point d'application, ou, pour employer le langage de tout le monde, de peser les corps.

Les instruments destinés à cet usage ont reçu, comme on sait, le nom de *Balances*. Les balances employées sont très-variées dans leurs formes et dans leur mode de construction, et nous en décrirons quelques-unes en détail, quand nous traiterons des applications de la physique. Ici nous nous bornerons à donner la description de la balance de précision, seule en usage dans les recherches scientifiques.

Le principe sur lequel sa construction est basée est celui-ci :

Un levier, barre rigide, inflexible, reposant par son milieu sur un point fixe, inébranlable, autour duquel il peut osciller librement, est en équilibre, quand deux forces égales sont appliquées à chacune de ses deux extrémités.

Pour qu'un levier de ce genre puisse servir de balance, il est indispensable que certaines conditions dont nous allons parler aient présidé à sa construction.

Il faut d'abord que les deux bras du levier ou fléau AO, OB (fig. 28) soient d'égales longueurs et de même poids, de manière à se faire isolément équilibre. Les deux bassins PP dans lesquels se placent, d'une part les poids étalonnés, d'autre part le corps à peser, doivent avoir aussi rigoureusement le même poids. En second lieu, le centre de gravité du système doit se trouver au-dessous du point ou de l'axe de suspension, et très-voisin de cet axe. Il résulte de cette seconde condition que

l'équilibre sera stable, et que les oscillations du fléau tendront toujours à le ramener dans une position horizontale, qui est la marque caractéristique de l'égalité de poids des corps placés dans les deux bassins ou plateaux de la balance.

Ces deux conditions sont seules nécessaires pour que la balance soit juste, mais elles ne suffisent pas pour qu'elle soit sensible, c'est-à-dire pour qu'elle accuse la moindre inégalité dans le poids, par une inclinaison du fléau facile à constater. Pour qu'une balance soit très-précise et très-sensible, il faut encore :

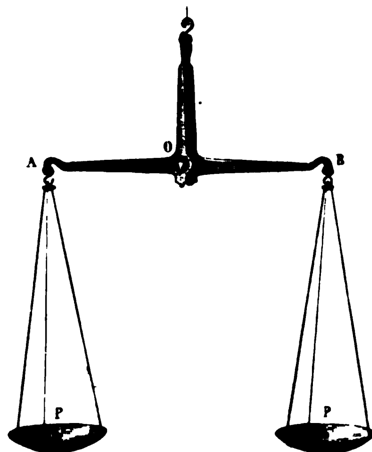


Fig. 28. — Balance.

Que les points ou axes de suspension du fléau et des deux bassins soient sur la même ligne droite : dans ce cas, la sensibilité est indépendante de la charge des plateaux;

Que le fléau ait une grande longueur et soit aussi léger que possible : alors l'amplitude des oscillations est plus grande pour une même inégalité dans les poids; c'est la même raison qui exige que le centre de gravité de la balance soit très-voisin de l'axe de suspension du fléau, sans pourtant coïncider avec lui.

Montrons maintenant comment ces conditions sont réalisées dans les balances de précision employées par les physiciens ou les chimistes.

Le fléau est formé d'un losange découpé de champ dans une plaque métallique d'acier ou de bronze, et évidé de façon à diminuer son poids sans augmenter sa flexibilité. En son milieu passe un prisme d'acier, dont l'arête horizontale forme l'axe de suspension du fléau. Cette arête repose sur un plan dur et poli, d'agate par exemple. Les deux extrémités du fléau portent deux prismes plus petits, mais dont les arêtes, éga-

lement horizontales et parallèles à celles du prisme principal, supportent les plans d'acier mobiles, auxquels viennent s'attacher les tiges qui portent les bassins ou plateaux. Les trois arêtes dont nous parlons doivent être rigoureusement alignées sur un même plan, et leurs distances parfaitement égales.

Au milieu et au-dessus du fléau, on voit deux boutons superposés, dont l'un est taillé en écrou, de sorte qu'on peut l'abaisser ou l'élever à volonté. On s'en sert pour élever ou abaisser le centre de gravité de la balance, de manière à le rapprocher ou à l'éloigner de l'axe de suspension et à donner



Fig. 29. — Balance de précision. Le fléau.

ainsi à la balance le degré de sensibilité qu'on veut. L'autre bouton est percé excentriquement d'un trou, de sorte que sa masse est répartie inégalement autour de l'axe : en le faisant tourner, on peut agir sur l'un ou sur l'autre bras du fléau, de façon à compenser une inégalité passagère, provenant par exemple de grains de poussière imperceptibles, en excès sur l'un des plateaux.

Au-dessus et en avant du prisme du milieu, le fléau porte une longue tige métallique ou aiguille, qui oscille avec lui et dont la position est exactement verticale, lorsque le plan formé par les trois axes de suspension est lui-même horizon-

tal. I extrémité inférieure de cette aiguille parcourt un arc de cercle en ivoire, dont la division *zéro* correspond à cette dernière position et la détermine. De part et d'autre du zéro, des divisions égales permettent de mesurer les amplitudes des oscillations de l'aiguille : il suffit que ces amplitudes soient égales de chaque côté, pour qu'on soit assuré de l'horizonta-



Fig. 30. — Balance de précision, d'après le modèle construit par M. Hempel.

lité du fléau dans le cas de l'équilibre et par conséquent de l'égalité des poids que portent les bassins.

Une balance ainsi construite doit être posée sur un plan inébranlable ; avant toute pesée, l'on s'assure, à l'aide de vis calantes et d'un niveau que porte le pied de l'instrument, et aussi par l'observation de l'aiguille, que sa position est bien horizontale. Pour éviter l'influence des courants d'air et les causes de détérioration provenant de l'humidité ou des autres agents

atmosphériques, on l'enferme dans une cage de verre, qu'on ferme pendant la pesée et qu'on ouvre seulement pour poser ou enlever les poids étalonnés. Du chlorure de calcium est en outre placé dans la cage, pour absorber l'humidité de l'air qu'elle renferme. Enfin, lorsque la balance ne sert pas, on soulève le fléau à l'aide d'une fourchette métallique, munie d'un engrenage à crémaillère dissimulé à l'intérieur de la colonne. De cette façon, les prismes conservent leurs arêtes vives, que la pression émousserait à la longue sans cette précaution.

On voit avec quelle précision sont réalisées, dans l'instrument que nous venons de décrire, les conditions d'exactitude d'une balance destinée aux usages scientifiques. Cette précision est indispensable pour les pesées si délicates, exigées par les recherches de physique ou de chimie moderne. Mais elles ne suffisent pas : il faut encore que l'opérateur y joigne l'habileté que donne l'expérience et des précautions dans le détail desquelles nous ne pouvons entrer. Il est inutile de dire que la précision de la balance serait complétement inutile, si les poids marqués n'étaient eux-mêmes d'une rigoureuse exactitude. Quelquefois, outre l'échelle des poids moyens, le savant possède une série de petits poids qu'il a pris soin de construire lui-même, à l'aide de fils de platine très-fins, et dont il se sert pour les pesées d'une précision inférieure au gramme, en décigrammes, centigrammes et milligrammes.

Dans la balance que représente la figure 30, le constructeur, M. Hempel, a imaginé une disposition qui évite les tâtonnements, quand l'équilibre est déjà obtenu à une faible fraction près. On voit, au-dessous des boutons à écrou, un demi-cercle gradué que parcourt l'aiguille horizontale, qu'on peut faire mouvoir de l'extérieur de la cage. Les degrés correspondent à des milligrammes, de sorte qu'en plaçant l'aiguille, par exemple, aux divisions 1, 2, 3.... du quart de cercle du côté gauche, c'est comme si l'on mettait dans le plateau de gauche 1, 2, 3.... milligrammes.

On construit aujourd'hui des balances assez précises pour trébucher au milligramme, quand chaque plateau se trouve chargé de cinq kilogrammes. Dans les balances d'analyse chimique, on pèse jusqu'aux dixièmes de milligrammes, mais alors la charge totale doit être très-faible, de 2 grammes par exemple.

Les physiciens emploient fréquemment la méthode dite *des doubles pesées*, pour remédier au défaut d'égalité des bras du fléau. Ils placent le corps à peser dans l'un des plateaux, puis ils établissent l'équilibre en mettant dans l'autre plateau une tare ordinairement formée de grenaille de plomb. En cet état, si les bras n'ont pas rigoureusement la même longueur, l'équilibre ne prouve pas l'égalité des poids. Mais si, enlevant le corps, on le remplace par des poids gradués jusqu'à ce que l'équilibre soit de nouveau rétabli, il est aisé de comprendre que ces poids représentent exactement le poids cherché, puisqu'ils produisent le même effet que le corps et dans les mêmes circonstances.

On verra plus loin que le poids d'un corps est modifié par le milieu dans lequel il est plongé, de sorte qu'il se trouve diminué de tout le poids du fluide qu'il déplace. D'autre part, son volume varie avec la température, et par conséquent, le même corps ne déplace pas toujours la même quantité de fluide : de là, la nécessité de tenir compte de ces éléments de variation, à moins qu'on ne prenne la précaution de faire les pesées dans un espace purgé d'air, c'est-à-dire dans le vide.

L'unité de poids généralement adoptée par les savants de tous les pays est celle de notre système métrique de poids et et mesures, c'est-à-dire le *kilogramme*.

Un décimètre cube d'eau distillée, pesé dans le vide à la température de 4 degrés centigrades au-dessus du zéro de la glace fondante, à la latitude de 45° et au niveau de la mer, pèse un kilogramme. Telle est la définition rigoureuse de l'unité de poids. Il ne faut pas oublier que si le poids varie avec la latitude et avec la hauteur au-dessus du niveau de la

mer, la variation ne se manifeste pas dans une balance, parce qu'elle affecte de la même manière les poids mis dans les deux plateaux. On peut donc ne pas en tenir compte, quand il s'agit des pesées faites avec la balance.

Disons encore, pour terminer ce chapitre, ce qu'on entend par poids spécifique et densité : plus loin, nous verrons comment se déterminent expérimentalement les nombres dont il s'agit. Des volumes égaux de diverses substances n'ont pas le même poids; un bloc de pierre pèse plus qu'un morceau de bois, moins qu'un morceau de fer de même dimension : c'est un fait d'une constatation facile, et connu de tout le monde. Imaginons qu'on prenne l'unité de volume de chacune d'elles, le décimètre cube, je suppose, et qu'on le pèse à une température constante. Les nombres qu'on obtiendra seront ce qu'on nomme les *poids spécifiques* de ces substances.

Les poids spécifiques varieraient, si l'on changeait l'unité de poids; mais leurs rapports resteraient invariables. On est donc convenu de prendre l'un d'eux pour unité : c'est le poids spécifique de l'eau qui a été choisi, parce que l'eau est une substance partout répandue sur la Terre, et qu'il est facile de se procurer à l'état de pureté. Les poids spécifiques exprimés ainsi se nomment *poids spécifiques relatifs*.

En faisant les mêmes comparaisons entre les masses des diverses substances, sous l'unité de volume, on a ce qu'on nomme les *densités relatives* des substances. Comme les nombres ainsi obtenus sont précisément les mêmes que les poids spécifiques, il arrive souvent qu'on les confond les uns et les autres sous la dénomination commune de *densité*, ce qui est une erreur manifeste.

CHAPITRE V.

LA PESANTEUR DANS LES LIQUIDES.

§ I. PROPRIÉTÉS DES CORPS A L'ÉTAT LIQUIDE.

Les phénomènes les plus curieux, les plus dignes d'attirer notre attention, se passent journellement sous nos yeux, sans que nous y prenions garde, à plus forte raison sans que nous cherchions à nous rendre compte des circonstances susceptibles de les produire. Telles sont, par exemple, les diverses apparences sous lesquelles nous voyons les corps, tantôt solides, tantôt liquides ou gazeux, quelquefois affectant successivement ces trois états. En quoi la glace diffère-t-elle de l'eau, et comment cette dernière se transforme-t-elle en vapeur? Quelle différence y a-t-il entre les arrangements des molécules qui constituent ces trois formes d'une même substance? Ce sont là des questions d'une solution très-difficile, sur lesquelles la science possède un petit nombre de données que nous aurons l'occasion de passer en revue dans les divers chapitres de cet ouvrage : bornons-nous maintenant à celles qui sont nécessaires à l'intelligence des phénomènes que nous allons décrire.

Ce qui distingue un corps solide, c'est la constance de sa forme, quand il n'est pas soumis à des forces mécaniques ou physiques susceptibles de le briser, ou de le faire passer à un nouvel état. Considérons une pierre ou un morceau de métal. Ses molécules sont tellement solidaires, qu'elles conservent leurs mutuelles distances, ne se séparant les unes des autres

que sous un effort extérieur plus ou moins énergique. Il en résulte que la position du centre de gravité du corps reste invariable, et que si la pierre reçoit un mouvement quelconque, est lancée dans l'espace, ou tombe sous l'action de la pesanteur, toutes ses molécules participeront à la fois et de la même manière au mouvement. On nomme *cohésion*, la force qui réunit ainsi les unes aux autres les diverses molécules d'un corps.

Il arrive bien, quand un corps solide est réduit en particules très-fines, en poudre très-ténue, que la cohésion dont il s'agit paraît, sinon annulée, du moins diminuée considérablement. C'est ainsi qu'on a de la peine à maintenir un monceau de sable en forme de cône un peu élevé : les grains glissent les uns sur les autres, et leur mouvement le long des talus de la masse a quelque analogie avec l'écoulement d'un liquide sur une pente. Cette analogie paraît plus sensible encore quand on emplit d'une poudre fine un vase dont le fond est percé d'un trou. L'écoulement se fait comme s'il s'agissait d'une masse liquide (fig. 31). Mais la ressemblance n'est qu'apparente, car chaque grain, quelque petit qu'il soit, est une masse qui jouit de toutes les propriétés des corps solides, et qui, en effet, n'en diffère nullement.

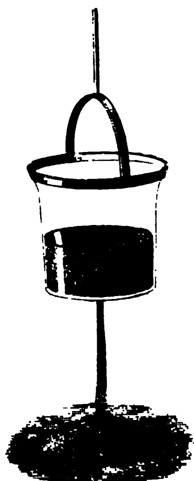


Fig. 31. — Écoulement des matières pulvérulentes.

Quel est donc, au point de vue physique, le caractère spécial qui différencie les liquides et les solides?

C'est que, tandis que dans ceux-ci la cohésion moléculaire est assez forte pour empêcher le mouvement de ses diverses parties, dans les liquides, au contraire, cette force est nulle ou presque nulle. De là l'extrême mobilité de leurs molécules, qui glissent ou roulent les unes sur les autres, sous l'action de la plus petite force. Grâce à cette mobilité, une masse liquide

n'a par elle-même aucune forme définie : elle prend, dès qu'elle est en équilibre, la forme du vase ou du bassin naturel qui la contient et dont les parois l'empêchent de se mouvoir sous l'action de la pesanteur.

Ce n'est pas à dire pour cela que la cohésion soit tout à fait nulle. En effet, quand une masse liquide est en mouvement, ses molécules changent de place, mais ne sont point isolées, séparées, comme dans une masse pulvérulente; les distances des molécules ne changent pas, et si la forme se modifie, le volume reste invariable. Quand on applique un disque solide à la surface d'un liquide qui le mouille (fig. 32), il faut un certain effort pour les séparer, et la couche liquide que le disque emporte avec lui montre bien que cet effort a été nécessité par la force qui unissait entre elles les molécules liquides. Il en serait de même, si l'on trempait une baguette dans un liquide susceptible de mouiller la substance dont la baguette est formée. En la retirant, on verrait qu'une goutte liquide reste suspendue à son extrémité. Enfin la forme sphérique que présentent les gouttelettes de rosée déposées sur les feuilles, ou de petites gouttes de mercure répandues sur une surface solide (fig. 33 et 34), ne s'explique que par la prépondérance de la cohésion moléculaire sur la pesanteur, qui tendrait sans cela à étaler les petites masses liquides dont nous parlons sur les surfaces qui les soutiennent. Toutefois, la cohésion est très-faible, comme le prouvent la mo-



Fig. 32. — Cohésion des molécules liquides.



Fig. 33. — Forme sphérique des gouttes de rosée.

bilité des molécules et la facilité avec laquelle cette cohésion est vaincue : une masse d'eau projetée d'une certaine hauteur tombe sur le sol sous une forme pulvérulente due, comme nous l'avons déjà dit, à la résistance de l'air.

Du reste, il y a une grande différence, sous ce rapport, entre les divers liquides. Les uns sont visqueux, et leurs mo-

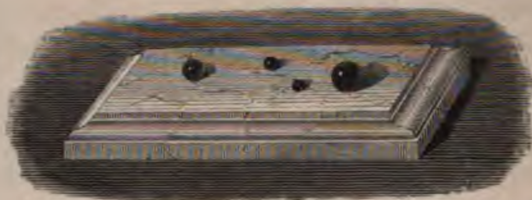


Fig. 34. — Cohésion des molécules liquides; gouttelettes de mercure.

lécules ne se déplacent qu'avec lenteur, mettant un certain temps à prendre la forme des vases qui les renferment : telles sont les résines, tel est le soufre à certaines températures. Les corps mous forment ainsi, comme une transition entre les solides et les liquides[1]. D'autres corps, les éthers, les alcools, possèdent un très-haut degré de liquidité, et même, passent avec la plus grande facilité à l'état de vapeur. Enfin, il en est un certain nombre, comme l'eau, dont le degré de liquidité est moyen entre ces deux extrêmes. Nous verrons plus loin que la chaleur ou la pression ont sur ces divers états une influence très-importante.

Quoi qu'il en soit de ces différences, les phénomènes que nous allons passer en revue se manifestent dans tous les corps liquides, à des degrés qui varient avec leur liquidité plus ou moins parfaite.

1. La cohésion des molécules qui forment les corps solides peut être vaincue par une pression suffisante. Des expériences d'un grand intérêt, dues à M. Tresca, ont mis en évidence ce fait, en apparence paradoxal, que les solides les plus durs, les plus denses peuvent, sans changer d'état, s'écouler à la manière des liquides quand on les soumet à de très-fortes pressions.

§ II. PRINCIPE DE L'ÉGALITÉ DE PRESSION.

Tout le monde connaît les célèbres expériences exécutées à la fin du dix-huitième siècle par les physiciens de l'Académie del Cimento, de Florence, sur la compressibilité des liquides. L'eau, ou en général une masse liquide quelconque change-t-elle de volume, quand on la soumet à une pression mécanique suffisamment considérable ? Telle est la question que ces savants se posèrent et crurent avoir résolue négativement. Ils firent fabriquer une sphère d'argent creuse, la remplirent d'eau, et la fermèrent ensuite hermétiquement. L'ayant alors énergiquement comprimée, ils virent l'eau suinter à travers ses parois. Ils firent d'autres expériences qui aboutirent au même résultat, et ils en conclurent que les liquides ne diminuent pas de volume sous l'action des forces mécaniques les plus grandes, ou, ce qui revient au même, sont incompressibles.

Mais des expériences plus récentes ont infirmé celles des académiciens de Florence. La compressibilité de l'eau et de plusieurs autres liquides a été constatée. Canton, en 1761, Perkins, en 1819, Œrstedt en 1823, et depuis, Despretz, Colladon et Sturm, Wertheim, Regnault ont mesuré avec une précision de plus en plus grande la diminution de volume qu'éprouvent divers liquides soumis à une pression déterminée. Toutefois, nous verrons plus tard que cette diminution est extrêmement faible, de sorte qu'on peut n'en pas tenir compte dans l'étude des phénomènes d'hydrostatique. Arrivons donc à la description des principaux de ces phénomènes.

Imaginez deux cylindres inégaux en diamètre, se communiquant à leurs bases par un tube [illegible]. Deux pistons parfaitement calibrés peuvent se mouvoir librement à l'intérieur de chacun d'eux, et toute la capacité [illegible]

comprise au-dessous des pistons est remplie d'eau. En cet état, pour qu'il y ait équilibre dans l'appareil, l'expérience prouve que si la charge du piston du petit cylindre, jointe à son propre poids, est par exemple de 1 kilogramme, le piston le plus grand devra être chargé, son poids compris, d'autant de fois 1 kilogramme que la surface de section du grand cylindre vaudra de fois la surface de section du petit. Dans l'exemple représenté par la figure 35, 1 kilogramme fait équilibre à 16 kilogrammes.

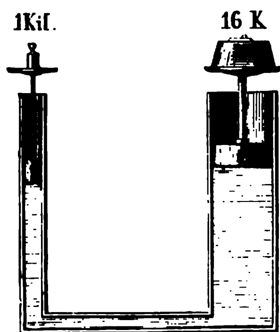


Fig. 35. — Principe de la presse hydraulique.

Les choses ne se passent-elles pas exactement ici, comme si la pression exercée sur la surface du petit cylindre s'était transmise, sans changer d'énergie, à travers le liquide sur chaque élément égal de la surface du grand cylindre.

Tel est en effet le principe sur lequel repose la construction d'une machine d'une grande utilité dans l'industrie, que nous décrirons dans les Applications de la Physique, et qui est connue sous le nom de *presse hydraulique*.

C'est à Pascal qu'est due la découverte de ce principe, conséquence de la mobilité et de l'élasticité des molécules liquides. En voici l'énoncé général :

Toute pression exercée sur un liquide enfermé dans un vase clos de toutes parts, se transmet avec la même énergie dans tous les sens. Il faut entendre par là que, si l'on prend dans le liquide ou sur les parois intérieures du vase une surface égale à celle par laquelle s'exerce la pression, cette surface éprouvera une pression rigoureusement égale à la première; si la surface qui reçoit la pression est double, triple, quadruple, etc., de celle qui la transmet, elle supportera une pression double, triple, quadruple.

Dès lors, si l'on ouvre dans les parois du vase des orifices de dimensions quelconques, il faudra, pour maintenir l'équi-

libre, exercer sur les pistons qui ferment ces orifices des pressions proportionnelles à leur superficie (fig. 36). L'énoncé du principe suppose que le liquide n'est pas pesant, ou qu'on fait abstraction de la pesanteur. Pour qu'il soit vérifiable par l'expérience, il faut, en évaluant les pressions exercées ou transmises, tenir compte des pressions qui proviennent de la pesanteur, pressions que le liquide exerce sur lui-même ou sur les parois du vase par son propre poids. L'expérience indiquée plus haut (fig. 35), et réalisée industriellement dans la presse hydraulique, est une conséquence évidente du principe de Pascal.

Nous avons vu, et c'est un fait d'observation que tout le

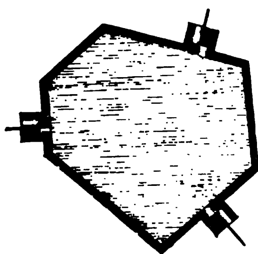


Fig. 36. — La pression exercée en un point d'une masse liquide se transmet également dans tous les sens.

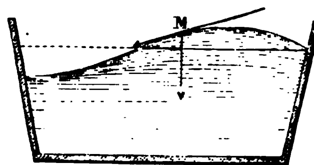


Fig. 37. — La surface des liquides en équilibre est horizontale.

monde peut vérifier, que la direction du fil à plomb est perpendiculaire à la surface d'un liquide en repos. Il est facile de comprendre qu'il n'en pouvait être autrement.

En effet, quand la surface d'une masse liquide n'est point plane et horizontale, une molécule telle que M (fig. 37) se trouve placée comme sur un plan incliné, et, en vertu de la mobilité propre aux liquides, elle tend à glisser le long de ce plan sous l'influence de son propre poids; l'équilibre sera impossible jusqu'à ce que la cause de l'agitation du liquide venant à cesser, peu à peu la surface se nivelle, et devienne rigoureusement plane et horizontale. Les grandes surfaces liquides des mers, des lacs et même des étangs, sont rarement en repos.

Les agitations de l'air, grands vents ou brises légères, suffisent pour produire cette multitude de proéminences mobiles qu'on nomme vagues, lames, ou simples rides. Mais si, au lieu de ne considérer qu'une portion restreinte, on embrasse par la vue ou par la pensée une étendue d'un rayon suffisant, ou si l'on contemple cette étendue d'une distance un peu considérable, les inégalités s'effacent dans l'ensemble, la masse liquide reste en repos, et sa surface paraît sensiblement un plan horizontal.

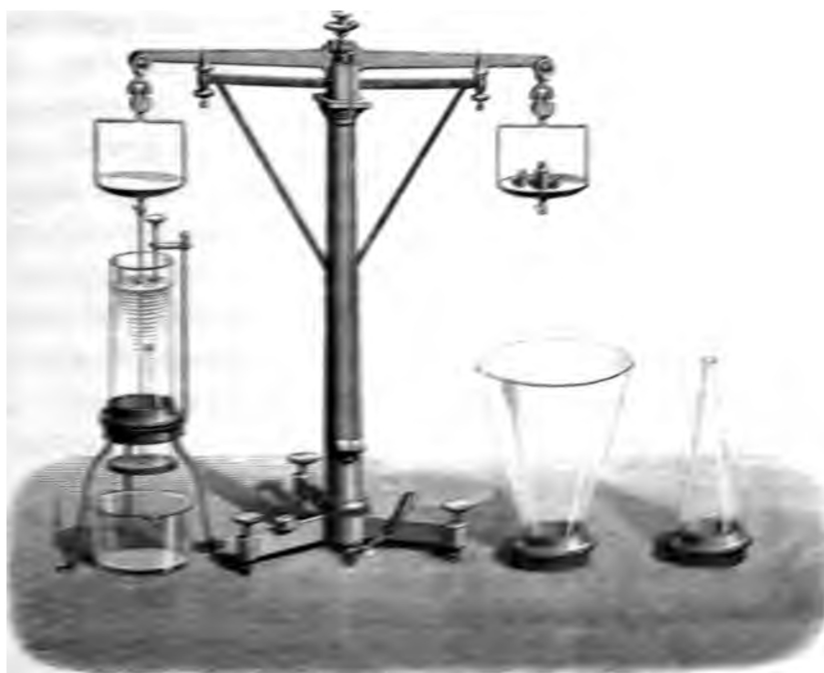
Il faut toutefois nous rappeler que la Terre est sphéroïdale, que les verticales des différents lieux ne sont pas parallèles, que la surface véritable des mers et des grands lacs participe de sa courbure, ainsi que le témoignent divers phénomènes optiques que nous avons décrits dans un de nos précédents ouvrages[1]. Mais cela même ne fait que confirmer la condition essentielle de l'équilibre d'une masse liquide contenue dans un vase et soumise à la seule action de la pesanteur.

La surface extérieure du liquide en équilibre est toujours de niveau, ou, si l'on veut, plane et horizontale. Voilà pour l'extérieur. Voyons maintenant ce qui se passe à l'intérieur. Chaque molécule liquide étant pesante, son poids peut être considéré comme une pression s'exerçant verticalement et devant se transmettre dans tous les sens aux autres parties du liquide, et aux parois du vase qui le contient. Quelle est la résultante des pressions de toutes les molécules? L'expérience va nous répondre.

Prenons un vase cylindrique, sans fond, supporté par un trépied d'une certaine hauteur (fig. 38). Un disque plat soutenu par un fil attaché à l'un des bras d'une balance, en guise de plateau, vient s'appliquer exactement sur les bords inférieurs du cylindre, de manière à lui servir de fond. On établit dans l'autre plateau une tare égale à la différence de son poids avec celui du disque; enfin on ajoute des poids marqués qui

1. Voir *Le Ciel*, notions d'astronomie à l'usage des gens du monde, pages 116 et 117 de la 3e édition.

pressent alors le disque ou obturateur sur les bords du cylindre; puis on verse de l'eau dans ce dernier. La pression du liquide sur le fond mobile peu à peu augmente; quand elle est devenue égale aux poids ajoutés, le moindre excès de liquide fait détacher l'obturateur, et l'eau s'écoule. Mais la pression diminue par cet écoulement, et le disque vient se coller de nouveau au cylindre. Une pointe [illegible] affleure à la surface de l'eau marque son niveau au moment de l'équilibre.



[illegible]

On trouve, par cette première expérience, comme on devait s'y attendre d'ailleurs, que *la pression exercée sur le fond du vase est précisément égale au poids du liquide.*

Si maintenant on répète l'expérience avec un vase de même fond que le cylindre, mais évasé par le haut, et par conséquent d'un beaucoup plus grand volume, on trouve identiquement le même résultat, c'est-à-dire que les mêmes poids font équilibre à une colonne de liquide de même hauteur. Le résultat est

encore le même, si le vase est évidé par le haut, pourvu que la surface de la base ou du fond reste la même.

Ainsi, la pression exercée par le poids d'un liquide sur le fond du vase qui le contient, est indépendante de la forme du vase, proportionnelle à la hauteur du liquide, égale enfin au poids d'un cylindre liquide ayant pour base le fond et même hauteur.

La démonstration expérimentale de la première partie de

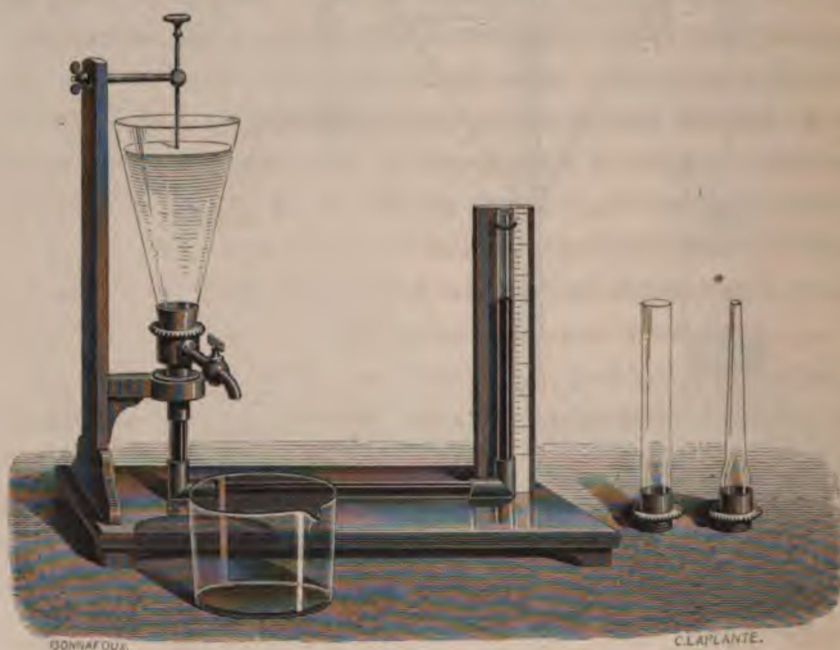


Fig. 39. — Pression d'un liquide sur le fond d'un vase ; appareil de Haldat.

cette loi se fait encore à l'aide de l'appareil de Haldat ; mais la mesure de la pression n'est pas donnée directement, comme dans la première méthode. Cette pression se manifeste alors par l'élévation d'une colonne de mercure dans un tube recourbé verticalement, comme le montre la figure 39.

Si, au lieu de chercher la valeur de la pression sur le fond du vase, on voulait connaître celle exercée à la surface d'une couche liquide inférieure, ou contre les parois latérales, on trouverait que cette pression est la même, à égalité de surface,

et à la même profondeur; elle se mesure aussi par le poids d'une colonne liquide verticale, ayant la surface pressée pour base, et pour hauteur celle du liquide.

L'expérience suivante démontre la loi pour le cas d'une surface prise sur une couche horizontale intérieure :

Un cylindre ouvert aux deux bouts et muni d'un disque ou obturateur mobile qui lui sert de fond, est plongé verticalement dans un vase plein d'eau (fig. 40). La main est obligée d'exercer un effort pour introduire le cylindre, ce qui montre que le liquide exerce, de bas en haut, une pression ou *poussée* qui maintient l'obturateur contre les bords du cylindre, et empêche l'eau de s'y introduire. Si, alors, on verse de l'eau dans le tube, l'équilibre persiste tant que le niveau intérieur est moins élevé que le niveau extérieur. Au moment où l'égalité de niveau est atteinte — même un peu auparavant, à cause du poids du disque — ce dernier cède, et l'équilibre est rompu. Le même résultat se produit toujours, quelle que soit la profondeur à laquelle le cylindre plonge. De là cette loi :

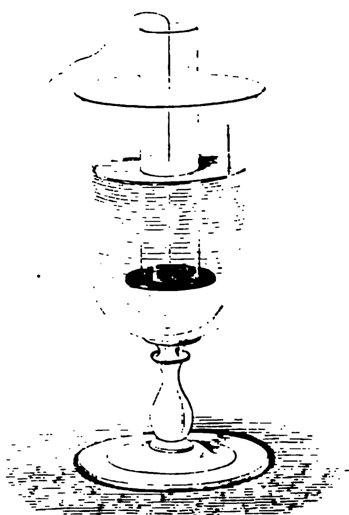


Fig. 40. — Pression d'une masse liquide sur une couche horizontale.

Dans un liquide en équilibre sous la seule action de la pesanteur, la pression en un point quelconque d'une même couche horizontale est constante; elle se mesure par le poids d'une colonne liquide ayant pour base l'élément de surface pressé, et pour hauteur la profondeur verticale de la couche.

Les pressions latérales sur les parois se mesurent de la même manière. Il faut ajouter que leur effort s'exerce toujours normalement, c'est-à-dire perpendiculairement à la surface de ces parois, de sorte qu'elles s'exercent en sens inverse de la pe-

santeur, si la paroi est horizontale et supérieure au liquide. Voici des expériences qui constatent l'existence et le sens de ces pressions.



Fig. 41. — Pression des liquides normale aux parois des vases.

Un cylindre (fig. 41) est terminé par une sphère métallique très-mince percée de trous dans toutes les directions. Si on le remplit d'eau, on voit celle-ci jaillir par tous les orifices, et la direction du jet est toujours normale à la portion de surface d'où il s'échappe. Dans les pompes d'arrosoir, l'eau jaillit en vertu de cette propriété des liquides, de presser latéralement les parois des vases qui les renferment.

Le tourniquet hydraulique montre à la fois la pression latérale s'exerçant dans deux sens opposés



Fig. 42. — Tourniquet hydraulique.

et aux deux extrémités d'un tube horizontal doublement coudé (fig. 42). Si ce tube n'était point ouvert, la pression la-

térale sur le bout serait contrebalancée par une pression égale et contraire sur le coude : le tube resterait immobile. Mais l'orifice pratiqué à chaque extrémité détermine deux jets de liquide, et la pression sur chaque coude n'est plus contrebalancée, de sorte qu'il en résulte un mouvement de recul et de rotation du tube.

Les pressions, latérales ou autres, exercées normalement aux parois, expliquent ce qu'on pourrait trouver de singulier dans l'égalité de pression sur les fonds de vases de différentes formes. Dans un vase conique évasé, ce sont les parois latérales qui supportent l'excès du poids total du liquide sur celui du cylindre mesurant la pression sur le fond. Dans un vase évidé, les parois subissent des pressions dans une direction opposée à celle de la pesanteur, et dont la somme est précisément égale à ce qui manque au volume liquide pour former le cylindre dont le poids équivaut à la pression sur le fond horizontal du vase (fig. 43.).

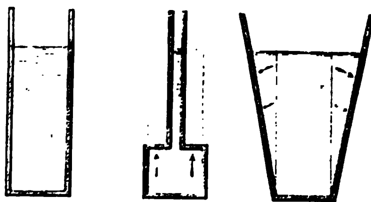
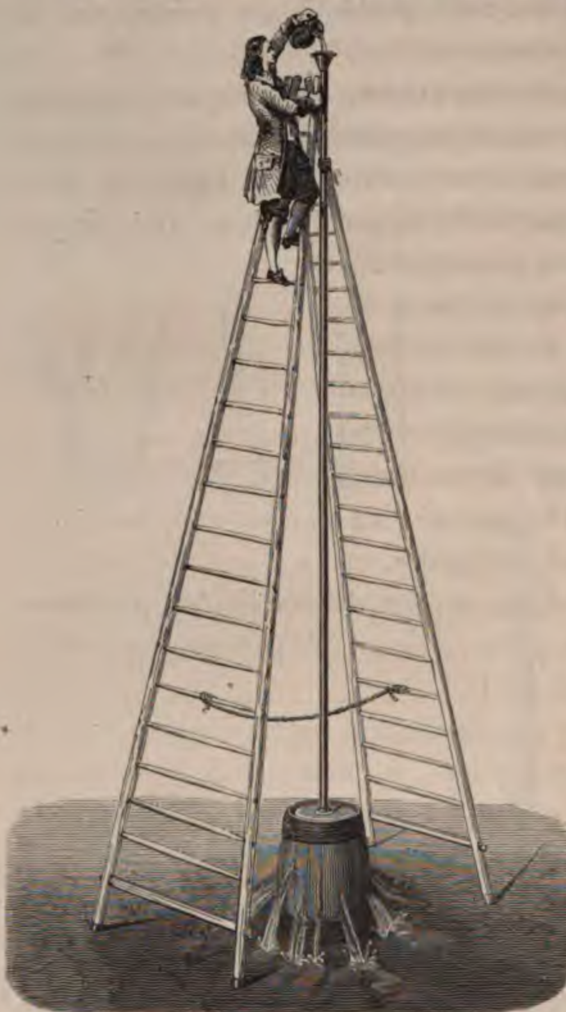


Fig. 43. — Paradoxe hydrostatique.

Ainsi s'explique ce phénomène, qui paraît singulier au premier abord, de colonnes liquides, si différentes de poids quand on les évalue sur le plateau d'une balance, et donnant la même pression sur l'unité de surface du fond des vases, à égalité de hauteur des liquides. Pascal a mis en évidence ce fait qu'on nomme le *paradoxe hydrostatique :* il fit éclater les douves d'un tonneau solidement construit et rempli d'eau, dont la bonde était surmontée d'un tube très-étroit et très-élevé, et cela simplement en remplissant d'eau ce tube, c'est-à-dire en ajoutant au poids total un poids insignifiant (fig. 44). Les parois du tonneau se trouvaient supporter alors les mêmes pressions que si elles eussent été surmontées d'une masse d'eau ayant même base que la surface du tonneau et même hauteur que le niveau du tube. Un kilogramme

d'eau peut produire, de la sorte, le même effet que des milliers de kilogrammes.

Si, dans le même vase, on introduit des liquides de densités diverses, non susceptibles de se mélanger, par exemple du mercure, de l'eau, de l'huile, ces liquides se rangent par ordre de densité. De plus, quand l'équilibre est établi (fig. 45), les surfaces de séparation sont planes et horizontales. Ce fait d'expérience pouvait se prévoir par le raisonnement, car l'équilibre d'un liquide isolé exigeant, comme nous l'avons vu, l'horizontalité de la surface, cet équilibre n'est pas rompu, quand cette surface supporte en outre en tous ses points les pressions dues au liquide superposé. On peut, avec quelques précautions, obtenir l'équilibre de deux liquides de densité presque égale, en plaçant le plus lourd à la partie supérieure; mais alors l'équilibre est instable, et la moindre agitation rétablit l'ordre des densités.


Fig. 44. — Paradoxe hydrostatique, crève-tonneau de Pascal.

L'eau de mer est plus pesante que l'eau douce. Aussi arrive-

t-il que l'on constate l'existence, dans les *fiords* ou golfes des côtes de Norvége, de bancs d'eau douce amenés par les rivières; celle-ci se maintient à la surface de l'eau salée sans se mélanger avec elle. Vogt raconte que, dans un fiord, l'un de ces bancs avait 1m,30 de profondeur. Ce phénomène n'est possible que dans les endroits calmes, et l'agitation causée par les vents a bientôt mélangé l'eau douce et l'eau salée. On a observé le même fait dans la Tamise, les marées amenant les eaux de la mer à une assez grande distance dans le lit du fleuve.



Fig. 45. — Équilibre des liquides superposés, de densités différentes.

L'équilibre d'un liquide contenu dans un vase et soumis à la seule action de la pesanteur est indépendante de la forme du vase. De là, cette conséquence toute naturelle, qu'un liquide s'élève à la même hauteur dans deux ou plusieurs vases qui communi-

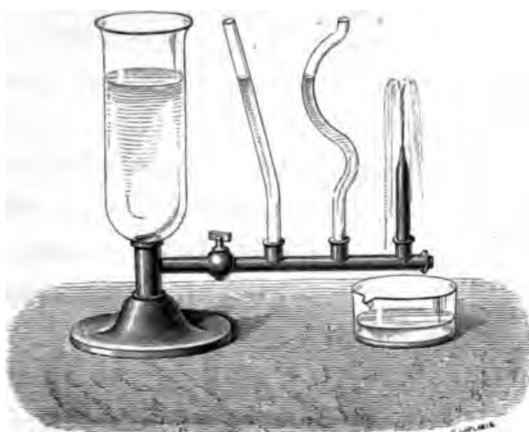


Fig. 46. — Egalité de hauteur d'un même liquide dans des vases communiquants.

quent entre eux. L'expérience confirme, en effet, que le niveau est toujours le même dans les différents tubes ou vases reliés entre eux par un tube de forme quelconque,

pourvu toutefois que le diamètre de chacun d'eux ne soit pas très petit (fig. 46).

C'est ce principe qui sert de base à la théorie des puits artésiens, à la construction des fontaines jaillissantes de nos jardins publics ou privés, et à la distribution des eaux dans les villes. Nous reviendrons sur ces applications intéressantes dans notre second volume. C'est le principe seul qui nous intéresse ici. L'eau qui arrive à l'orifice d'un puits artésien,

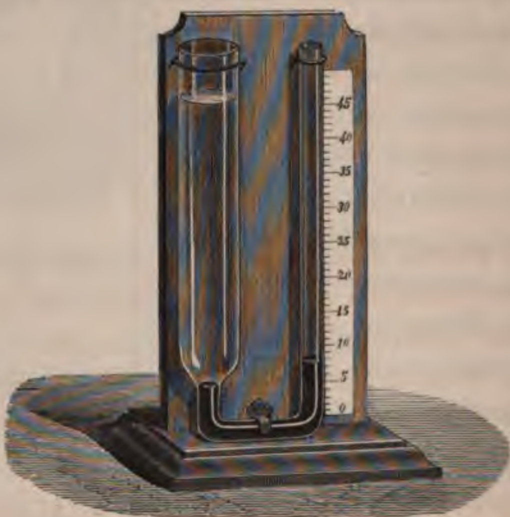


Fig. 47. — Vases communiquants. Hauteurs de deux liquides de densités différentes.

provient souvent de nappes liquides très-éloignées, formant comme des fleuves souterrains, dont le niveau est, à l'origine, plus élevé qu'au point d'arrivée. Les pressions se transmettent ainsi à distance, et le jet qui en résulte monterait précisément à la même hauteur que la source originelle, sans la résistance de l'air et les frottements que la colonne ascensionnelle subit dans son trajet. Il en est de même des jets d'eau approvisionnés par un réservoir plus élevé que le bassin et communiquant avec lui par des conduites souterraines.

Si deux vases communiquants sont pleins de liquides de densités différentes, les hauteurs ne sont plus égales (fig. 47).

Versons d'abord du mercure. Le niveau s'établira dans les

deux tubes à la même hauteur. Dans le tube de gauche, versons maintenant de l'eau : le mercure montera dans le tube de droite, sous l'influence de la pression du nouveau liquide. L'équilibre établi, on constate aisément que les hauteurs des niveaux de l'eau et du mercure mesurés au-dessus de leur commune surface de séparation, sont en raison inverse de leurs densités. Par exemple, si le mercure s'élève de 3 millimètres, la colonne d'eau aura une longueur de 40mm,8, c'est-à-dire 13.6 fois plus considérable. Or, l'eau à volume égal pèse 13,6 fois moins que le mercure.

§ III. ÉQUILIBRE DES CORPS PLONGÉS DANS LES LIQUIDES. PRINCIPE D'ARCHIMÈDE.

Quand on plonge dans l'eau une substance plus légère que ce liquide, un morceau de bois, de liége, tout le monde sait qu'il faut un certain effort pour l'y maintenir. Si on abandonne l'objet à lui-même, il s'élève verticalement, monte à la surface où il flotte, en partie plongé, en partie hors de l'eau.

Quelle est la cause de ce phénomène si connu? La pesanteur? Dans l'air, le même corps abandonné à lui-même tombe verticalement; dans l'eau, les pressions latérales, les pressions de haut en bas et de bas en haut se détruisent en partie, et se réduisant à une poussée qui s'exerce en sens inverse de la direction de la pesanteur [illegible] cette poussée dans une expérience [illegible] On démontre, et l'expérience confirme [illegible], que la poussée est précisément égale au poids du liquide déplacé. Le point d'application de cette force [illegible] de pression, est le centre de gravité du volume [illegible] le corps [illegible].

La perte de poids [illegible] les corps plus légers que l'eau [illegible] on conçoit qu'il doit prendre un mouvement opposé à celui que lui donnerait la pesanteur [illegible]

de bois ou de liége à la surface du liquide. Mais cette perte existe aussi pour les corps plus lourds que l'eau, et pour les liquides de nature quelconque. Personne n'ignore que c'est Archimède, l'un des plus grands géomètres et physiciens de l'antiquité, qui a eu la gloire de découvrir ce principe, qui porte son nom, et dont voici l'énoncé général :

Tout corps plongé dans un liquide subit une perte de poids précisément égale au poids du liquide déplacé.



Fig. 48. — Démonstration expérimentale du principe d'Archimède.

La démonstration expérimentale du principe d'Archimède se fait à l'aide de la balance hydrostatique.

Soit un cylindre creux, dont la capacité intérieure soit rigoureusement égale au volume d'un cylindre massif, de sorte que ce dernier puisse remplir exactement le premier. L'un et l'autre sont munis de crochets, de sorte qu'on peut suspendre le cylindre plein surmonté du cylindre creux au-dessous de l'un des plateaux de la balance hydrostatique (fig. 48). Cela fait, on relève le fléau par le moyen de la crémaillère adaptée

à la balance, assez haut pour qu'un vase plein d'eau puisse être placé au-dessous du système des deux cylindres, quand le fléau est horizontal.

En cet état, on établit l'équilibre à l'aide d'une tare mise dans l'autre bassin. Si l'on abaisse alors le fléau de la balance, le cylindre plein s'enfonce dans l'eau, et l'équilibre est rompu : le bassin chargé de poids l'emporte. Cela seul suffirait pour constater la poussée verticale, ou la perte de poids du corps plongé. Pour mesurer cette poussée, on immerge entièrement le cylindre massif; puis on cherche à rétablir l'équilibre en versant peu à peu de l'eau dans le vase cylindrique. On reconnaît ainsi que le fléau redevient horizontal, dès que le cylindre creux se trouve entièrement rempli de liquide.

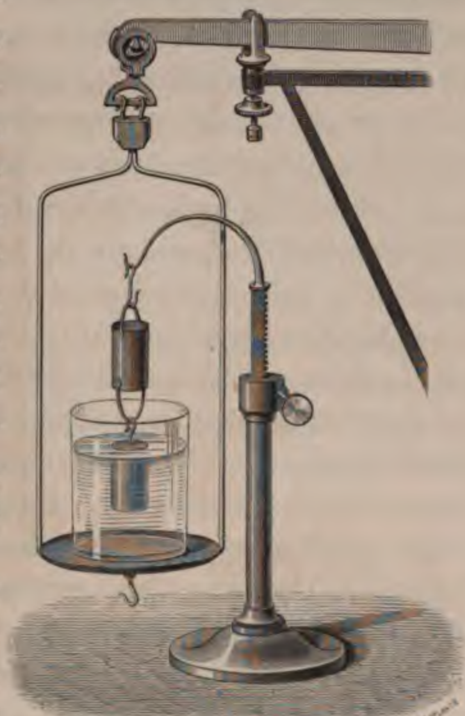


Fig. 49. — Principe d'Archimède. Réaction d'un corps plongé sur le liquide qui le contient.

Ainsi la perte de poids était justement égale au poids de l'eau qu'on a versée, c'est-à-dire, de l'eau déplacée par le corps immergé. L'expérience qui précède démontre donc le principe d'Archimède avec une pleine évidence.

Comment donc se fait-il que l'équilibre ne soit pas rompu, quand, après avoir équilibré un vase plein de liquide et un corps solide placés l'un à côté de l'autre sur le plateau d'une balance, on immerge le corps solide dans l'eau? Ce dernier perd de son poids : on vient de le démontrer. Cependant l'équilibre subsiste. Il faut de toute nécessité que le vase et

son contenu aient augmenté d'un poids équivalent, ou, si l'on veut, que l'eau subisse de haut en bas une pression égale à la poussée exercée par elle de bas en haut. C'est en effet ce qu'on peut vérifier à l'aide de l'appareil décrit plus haut.

On pèse un vase en partie rempli d'eau. Puis, on y plonge le cylindre plein, supporté extérieurement, comme le montre la figure 49. L'équilibre est rompu : le fléau penche du côté du vase. De combien le poids de l'eau se trouve-t-il augmenté par l'immersion ? Précisément du poids de l'eau déplacée : ce qui le prouve, c'est qu'il suffit, pour rétablir l'équilibre, d'enlever du vase un volume d'eau juste assez grand pour remplir le cylindre creux de même capacité intérieure que le corps immergé.

Le principe d'Archimède est d'une grande importance. Il a permis de trouver les conditions d'équilibre des corps plongés ou des corps flottants, d'expliquer nombre de phénomènes d'hydrostatique, et de résoudre une foule de problèmes d'un grand intérêt pratique. Par exemple, on a pu déterminer d'avance qu'elles doivent être la forme, la charge, et la distribution du chargement des navires pour que la stabilité d'équilibre soit convenablement combinée avec les autres qualités du navire, la rapidité, etc. Nous avons à chaque instant, dans les phénomènes qui se passent au sein des liquides, des témoignages de l'existence de la poussée. Quand nous prenons un bain, si nous comparons l'effort que nécessite le soulèvement d'un de nos membres au sein de l'eau, avec celui qu'il nous faut faire pour l'élever hors du liquide, nous sommes frappés de la différence en faveur du premier mouvement. Des pierres très-lourdes que nous aurions de la peine à soutenir hors de l'eau, sont remuées et soulevées avec facilité, quand elles sont immergées. Enfin, quand nous avançons dans l'eau d'une rivière dont la profondeur augmente insensiblement, nous sentons diminuer peu à peu la pression

de nos pieds sur le fond de la rivière ; et un moment arrive où nous n'avons plus prise pour marcher en avant. Notre corps, dont le poids est presque annulé par la poussée du liquide, tend à prendre une position horizontale nécessitée par l'équilibre instable où il se trouve alors.

Ceci nous amène à dire quelques mots des conditions d'équilibre des corps plongés dans les liquides, ou susceptibles de flotter à leur surface.

Il est d'abord évident qu'un corps immergé ne peut être en équilibre, si son poids surpasse celui d'un égal volume de liquide. Dans ce cas, il tombe sous l'action de l'excès de ce poids sur la poussée. Il ne restera pas davantage en équilibre, si son poids est moindre qu'un égal volume de liquide ; dans cette hypothèse, il remontera à la surface, sollicité par l'excès de la poussée sur son poids. C'est ainsi que le liége, le bois, du moins certaines espèces de bois, la cire, la glace surnagent à la surface de l'eau, tandis que la plupart des métaux, des pierres, et une multitude de substances tombent au fond. Le mercure étant un liquide d'une grande densité, la plupart des métaux peuvent flotter à sa surface. Une balle de plomb, un morceau de fer, de cuivre, ne s'y enfoncent point ; l'or et le platine, au contraire, tomberaient au fond d'une masse de mercure.

Il reste à examiner le cas d'un corps dont le poids est précisément égal à celui du liquide, à égalité de volume. Si sa substance est parfaitement homogène, le corps restera en équilibre, dans quelque position qu'on le place au milieu du liquide. Dans ce cas, le poids et la poussée, non-seulement sont égaux et contraires, mais encore s'appliquent tous deux au même point, c'est-à-dire que le centre de gravité et le centre de pression coïncident.

Les poissons montent et descendent, à volonté, au milieu de l'eau. Ce qui rend possibles ces divers mouvements, c'est la faculté qu'ont ces animaux de comprimer ou de gonfler une sorte de poche élastique remplie d'air, placée dans l'abdomen. Suivant le volume de la *vessie natatoire* — c'est le nom de

cet organe — le corps du poisson est, tantôt plus léger, tantôt plus lourd que le volume d'eau qu'il déplace : dans le premier cas il s'élève, il descend au contraire dans le second.

M. Delaunay cite, dans son *Cours de mécanique*, un phénomène assez curieux qui s'explique très-aisément par le principe d'Archimède : « Lorsqu'on introduit, dit-il, un grain de raisin dans un verre plein de champagne, ce grain tombe immédiatement au fond du verre. Mais l'acide carbonique, qui se dégage continuellement de la liqueur, vient bientôt s'arrêter, sous forme de petites bulles, tout autour du grain. Ces bulles de gaz, faisant corps pour ainsi avec le grain de raisin, en augmentent le volume, sans que son poids augmente notablement; la poussée du liquide, qui était d'abord plus petite que le poids du grain, ne tarde pas à devenir plus grande que ce poids, et le grain monte jusqu'à la surface du liquide. Si alors, on donne une petite secousse au grain, pour en détacher les bulles d'acide carbonique qui étaient adhérentes à sa surface, on le voit redescendre au fond du verre; puis, au bout de quelque temps, il remonte de nouveau. L'expérience peut être ainsi continuée, tant que dure le dégagement de l'acide carbonique. »

Si le corps plongé n'est pas homogène, si, par exemple, c'est un assemblage de liége et de plomb, dont le poids total soit celui de l'eau déplacée (fig. 50), sans que le centre de gravité soit commun aux deux corps, le centre de gravité de l'ensemble et le centre de pression ne coïncident plus. Il faut donc pour l'équilibre, que ces deux points soient sur une même verticale, comme dans les positions 1 et 2; et d'ailleurs l'équilibre sera instable, si c'est le centre de gravité qui est à la partie supérieure. Dans la position 3, cette condition n'étant pas réalisée, l'équilibre n'aura lieu que lorsque les oscillations du corps lui auront fait prendre la position 1.

Quand un corps déplace un volume de liquide dont le poids est supérieur au sien — ce qui peut provenir de la différence des densités, ou de la forme du corps — il flotte à la surface.

Dans ce cas, l'eau déplacée a même poids que le corps avec la charge qu'il supporte : ainsi la coque d'un navire, son chargement en hommes, en matériel, en marchandises, pèsent réunis juste autant que le volume d'eau de mer déplacée au-dessous de la flottaison. D'ailleurs la seconde condition d'équilibre est encore la même, c'est-à-dire que le centre de gravité du corps et le centre de pression doivent être sur une même verticale. Mais il n'est plus indispensable, pour la stabilité, que le premier point soit au-dessous de l'autre. D'ailleurs selon la position du corps flottant et sa forme, la forme



Fig. 50. — Équilibre d'un corps plongé dans un liquide de même densité que la sienne.

du volume déplacé change elle-même, et le centre de pression change également, de sorte qu'à chaque instant les conditions d'équilibre varient.

Pour les navires, l'équilibre parfait n'existe jamais rigoureusement, même lorsque la mer est unie et calme. Des oscillations d'une amplitude plus ou moins grande ont lieu à tout instant ; l'essentiel, on le conçoit, c'est que, dans les circonstances les plus défavorables, les mouvements du navire ne soient pas assez prononcés pour le faire chavirer.

§ IV. DÉTERMINATION DE LA DENSITÉ DES CORPS.

Le principe d'Archimède sert à résoudre un problème très-utile, celui de la détermination de la densité des corps liqui-

des ou solides. Indiquons sommairement les méthodes adoptées pour cette détermination.

Rappelons-nous que la densité d'un corps est le rapport qui existe entre son poids à 0° et celui d'un égal volume d'eau pure prise à la température de 4 degrés du thermomètre centigrade. Que faut-il donc pour trouver le nombre qui mesure la densité d'un corps? Premièrement, connaître son poids : la balance sert à cet usage; deuxièmement, connaître le poids d'un égal volume d'eau : nous allons décrire les opérations propres à cette détermination. Ces deux nombres obtenus, le quotient de la division du premier par le second donne la densité.

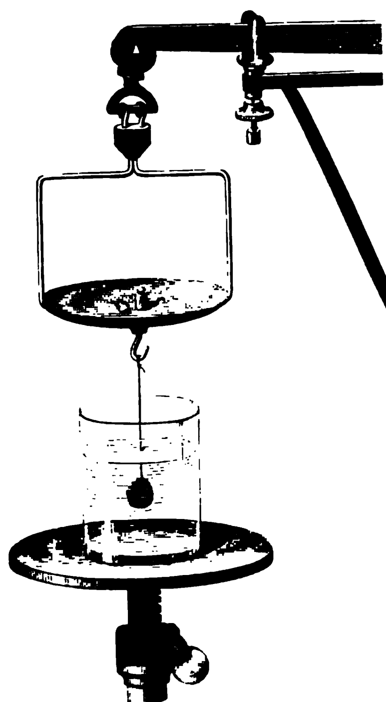


Fig. 51.— Densité des corps solides. Méthode de la balance hydrostatique.

La seule difficulté est donc de trouver le poids d'un volume d'eau égal à celui du corps. Prenons quelques exemples qui nous feront comprendre les trois méthodes usitées.

Soit un morceau de fer pesant dans l'air 246 gr. 5. On le suspend par un fil très-fin à l'un des plateaux de la balance hydrostatique, et on met une tare dans l'autre plateau pour l'équilibrer. On abaisse alors la crémaillère de la balance jusqu'à ce que le morceau de fer plonge dans l'eau (fig. 51). A ce moment, le fléau trébuche du côté de la tare, et l'on est obligé de mettre 31 gr. 65 en poids marqués dans le plateau qui soutient le corps pour rétablir l'équilibre. Ces poids représentent le poids de l'eau déplacée. En divisant 246,5 par 31,65 on trouve 7,788 pour la densité du fer, ce qui revient à dire

que le fer pèse, à volume égal, 7 fois et 788 millièmes autant que l'eau.

Voici une seconde méthode :

La figure 52 représente un instrument appelé *aréomètre*[1] dont l'invention est due au physicien Charles, bien qu'on l'attribue généralement à Nicholson: il est construit de telle sorte que, plongé dans l'eau, il affleure précisément en un point marqué sur sa tige supérieure, lorsque le plateau qui la sur-

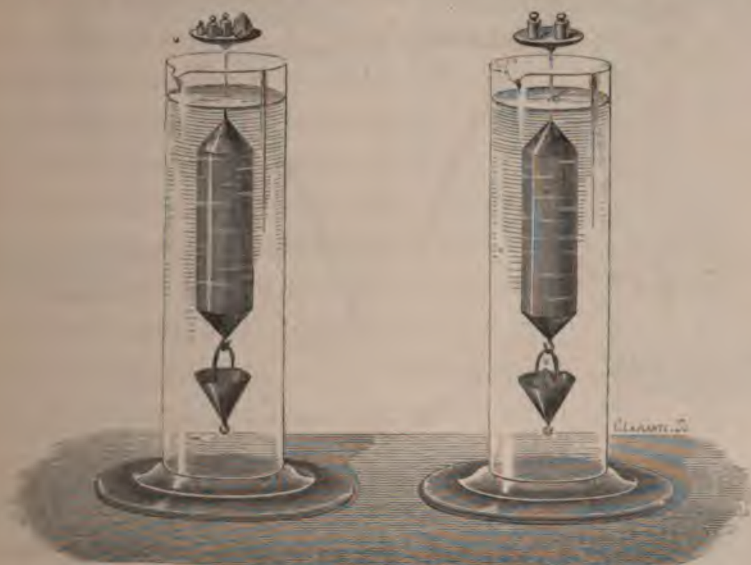


Fig. 52. — Densité des corps solides. Aréomètre de Charles ou de Nicholson.

monte est chargé d'un poids connu : soit 100 grammes ce poids. On place le corps dont la densité est cherchée dans le petit plateau, et l'on ajoute des poids marqués pour produire l'affleurement. Si l'on a dû mettre 35 gr. 8, je suppose, la différence 64 gr. 2 entre ce dernier poids et 100 grammes, donne évidemment le poids du corps dans l'air.

Ce qui précède montre déjà que l'aréomètre est une véritable balance. On ôte le corps du plateau supérieur, et on le place dans le petit vase suspendu au-dessous de l'instrument :

1. Du grec *araios* léger et *metron* mesure. Les aréomètres ont servi d'abord à mesurer les densités des liquides, comme nous le verrons plus loin.

il perd de son poids, de sorte que l'aréomètre remonte, et qu'il faut ajouter des poids marqués pour rétablir l'affleurement : soit 31 grammes. Tel est le poids d'un volume d'eau égal à celui du corps. En divisant 64,2 par 31, on trouve 2,07, densité cherchée (c'est la densité du soufre).

Dans le cas où le corps est moins dense que l'eau, on retourne le petit panier en sens inverse, et le corps que la poussée tend à faire remonter, rencontrant un obstacle, n'en reste pas moins plongé.



Fig. 53. — Densité des corps solides. Méthode du flacon.

Une troisième méthode pour évaluer la densité des corps est celle du flacon. On met dans le plateau d'une balance le fragment du corps dont la densité est cherchée, et, à côté, un flacon exactement rempli d'eau et bien bouché à l'aide d'un bouchon rodé à l'émeri (fig. 53). On établit l'équilibre à l'aide de poids marqués. On introduit alors le corps dans le flacon, et on le rebouche, en ayant soin d'enfoncer le bouchon au même niveau. Une certaine quantité d'eau a dû sortir, dont le volume est précisément égal à celui du corps qui a pris sa place. On replace le flacon, après l'avoir bien essuyé extérieurement, sur le plateau de la balance, et les poids qu'il faut enlever pour rétablir l'équilibre donnent le poids de l'eau expulsée. Le procédé du flacon n'est pas, on le voit, une application du principe d'Archimède, comme les deux premiers.

Ces trois méthodes exigent quelques précautions : le corps plongé dans l'eau retient, adhérentes à sa surface, des bulles d'air qu'il faut faire disparaître. Si le corps absorbe facilement l'eau, ou même s'y dissout, on se sert d'un autre liquide, d'huile par exemple, après quoi, il reste à rapporter la densité du corps relative à l'huile, à celle de l'eau, ce qui n'offre d'ailleurs aucune difficulté.

La densité des liquides s'obtient par des procédés analogues à ceux que nous venons de décrire. Une boule de verre creuse, et lestée de façon à être plus lourde que les liquides à comparer, est accrochée sous le plateau de la balance hydrostatique (fig. 54). Pesée dans l'air, puis dans l'eau, la différence des pesées donne le poids d'un volume d'eau égal au sien. Bien essuyée et pesée dans le le liquide dont on cherche

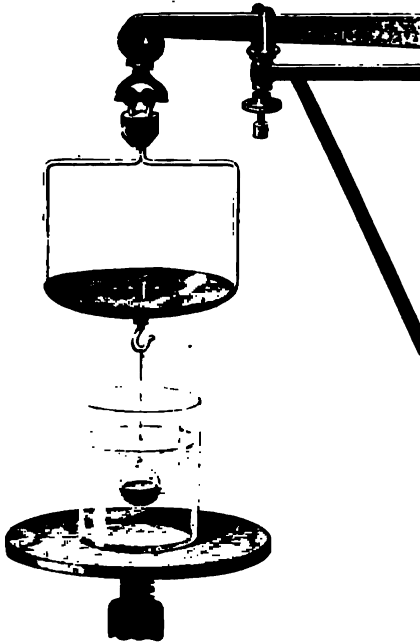


Fig. 54. — Densité des liquides. Balance hydrostatique.

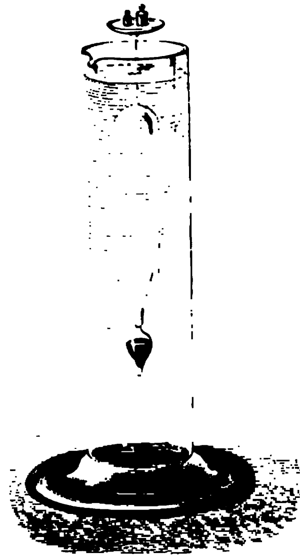


Fig. 55. — Densités des liquides. Aréomètre de Farenheit.

la densité, cette seconde différence donne le poids d'un égal volume du liquide. Divisant ce dernier résultat par le premier, on trouve pour quotient la densité inconnue.

L'aréomètre dû à Fahrenheit (fig. 55), plongé dans l'eau, exige qu'on mette un poids donné pour produire l'affleurement au point fixe marqué sur sa tige. Il est clair que ce poids additionnel joint à celui de l'instrument marque le poids du volume d'eau déplacé. Plongé dans un autre liquide, dans l'huile par exemple, on obtient de la même façon le poids

d'un volume d'huile égal au volume d'eau. La division de ce second poids par le premier donne la densité de l'huile.

Enfin, avec un flacon terminé par une étroite tubulure (fig. 56) qu'on emplit successivement d'eau et de l'autre liquide jusqu'à un point fixe marqué sur la tige, on trouve les poids de deux volumes égaux d'eau et de liquide, d'où la densité.



Fig. 56. — Densité des liquides. Méthode du flacon.

Voici, pour terminer, un tableau des densités de quelques-uns des corps solides et liquides les plus connus. Comme on le verra bientôt, les volumes des corps changent selon le degré de chaleur ou de température où ils se trouvent. Ces variations n'affectent pas les poids, mais les densités qui sont variables avec la température. Il a donc fallu les rapporter à une température constante. Pour l'eau seule, cette température est 4°; pour toutes les autres substances solides ou liquides, on est convenu de prendre celle de la glace fondante ou 0°.

DENSITÉS DE DIFFÉRENTS CORPS A 0°. — CORPS SOLIDES.

Métaux.		Minéraux, roches, etc.		Végétaux, etc.	
Platine laminé..	22,06	Diamant	3,53	Buis de Hollande.	1,32
Or fondu......	19,26	Marbre. 2,65 à.	2,84	Cœur de chêne..	1,17
Plomb fondu...	11,35	Granit........	2,75	Ébène noir	1,19
Argent fondu ..	10,47	Quartz........	2,65	Hêtre..........	0,75
Cuivre laminé..	8,95	Grès.... 2,20 à	2,65	Sapin..........	0,66
— fondu...	8,85	Verre... 2,44 à	2,50	Chêne	0,61
Fer...........	7,79	Pierre à plâtre.	2,20	Saule	0,49
Étain.........	7,29	Porcelaine.....	2,24	Peuplier	0,39
Zinc..........	7,19	Soufre........	2,09	Liége..........	0,24
Aluminium....	2,67	Glace à 0°.....	0,93	Moelle de sureau.	0,08

DENSITÉS DE DIVERS LIQUIDES A 0°.

Mercure	13,596	Eau à 4°......	1,000	Huile d'olive...	0,915
Brome.......	2,966	Eau à 0°.......	0,9998	Essence de térébenthine....	0,869
Acide sulfurique concentré	1,841	Eau de mer...	1,026	Alcool absolu..	0,792
Acide nitrique eau-forte id.	1,520	Lait..........	1,03	Éther sulfurique........	0,736
		Vin de Bordeaux	0,994		
		— Bourgogne	0,991		

CHAPITRE VI.

PESANTEUR DE L'AIR ET DES GAZ.

§ I. L'AIR ET LES AUTRES GAZ SONT PESANTS, ÉLASTIQUES ET COMPRESSIBLES.

Nous habitons le fond d'un océan fluide dont la profondeur moyenne est au moins cent fois aussi grande que celle des mers, et qui enveloppe de toutes parts le sphéroïde terrestre. La substance dont cette mer est formée est l'air, mélange de diverses substances gazeuzes,dont les deux principales sont l'oxygène et l'azote : le gaz acide carbonique, la vapeur d'eau, quelquefois l'ammoniaque s'y trouvent aussi, mais dans des proportions variables, tandis que les deux premiers gaz y sont partout dans le même rapport. Ce rapport est, à peu de chose près, sur un volume égal à 100, 21 pour l'oxygène et 79 pour l'azote.

L'air est, comme on sait, l'aliment indispensable de la respiration des animaux; ceux-mêmes qui vivent habituellement dans l'eau ne peuvent s'en passer; il n'est pas moins nécessaire aux végétaux qui, sous l'influence de la lumière, décomposent l'acide carbonique de l'air, fixent le charbon et restituent l'oxygène, qu'absorbe au contraire la respiration animale.

La transparence de l'air ne permet pas de constater sa présence par la vue, du moins dans un intervalle d'une faible étendue. Mais à de grandes distances, l'interposition des couches gazeuzes est très-sensible; elle donne aux corps éloi-

gnés, aux montagnes qui bornent l'horizon une teinte bleuâtre qu'on retrouve très-éclatante et très-pure dans la couleur du ciel, quand l'atmosphère est sans nuages. Sans la couleur bleue de l'atmosphère, le ciel serait incolore, c'est-à-dire entièrement noir; et les étoiles s'y détacheraient brillantes en plein jour. Pendant la nuit, l'enveloppe aérienne n'étant plus éclairée par les rayons du soleil, mais seulement par les faibles lueurs de la lune ou des étoiles, paraît d'un bleu sombre; et, si l'on s'élève le jour sur une très-haute montagne, le même phénomène se produit, parce que les couches d'air qui la surplombent, moins épaisses et moins denses, n'absorbent plus qu'une faible portion des rayons bleus de la lumière solaire.

L'existence de l'air nous est d'ailleurs révélée par d'autres phénomènes, que nous percevons à l'aide de l'organe de l'ouïe et de celui du toucher. Quand l'air est en repos, il suffit que nous nous mettions nous-mêmes en mouvement pour sentir sa présence. Sa masse résiste au déplacement que nous lui imprimons, et cette résistance est sensible sur nos mains ou sur notre visage. Mais la matérialité de l'air se manifeste bien plus vivement encore par les mouvements dont il est lui-même animé; depuis les brises les plus légères jusqu'aux vents violents des ouragans et des tempêtes, toutes les agitations atmosphériques sont des preuves continuelles de son existence.

Enfin, c'est grâce aux vibrations communiquées à l'air par les corps sonores, que le son se propage jusqu'à notre oreille. L'air lui-même, quand il est mis en vibration dans des conditions convenables, devient un producteur du son, comme nous le verrons dans le deuxième Livre de cet ouvrage. La plupart de ces propriétés de l'air ont été utilisées : nous en décrirons plus tard de nombreuses et très-intéressantes applications.

Ce qui va faire l'objet de ce chapitre, c'est l'étude des propriétés de l'air considéré comme corps pesant, ce sont les

phénomènes dus à la pesanteur de l'air ou des autres substances gazeuzes. Car *l'air est pesant*, comme il est aisé de s'en rendre compte par une expérience très-simple.

Nous décrirons bientôt l'instrument qui sert à enlever d'un vase ou récipient l'air qu'il contient, à y *faire le vide*, comme disent les physiciens. C'est ce qu'on nomme la machine pneumatique. Or, si l'on prend un ballon de verre muni d'un col métallique à robinet, et qu'on le pèse après y avoir fait le vide (fig. 57), il suffit d'ouvrir le robinet et d'y laisser rentrer l'air, pour constater que le fléau de la balance penche alors du côté du ballon. Pour rétablir l'équilibre rompu, on doit ajouter des poids marqués, environ 1 gr. 29 pour chaque litre dont se compose la capacité du ballon.

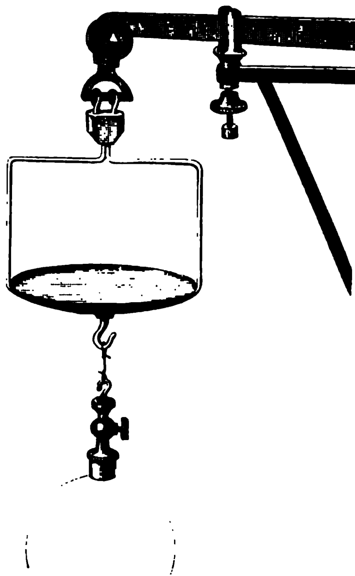


Fig. 57. — Démonstration expérimentale de la pesanteur de l'air et des gaz.

Voilà donc la pesanteur de l'air directement démontrée. La même expérience, faite à l'aide d'autres gaz, démontrerait de la même manière que les corps à l'état gazeux sont, comme les liquides et les solides, soumis à l'action de la pesanteur. Galilée a le premier soupçonné et démontré cette vérité si importante que l'air est pesant : mais l'expérience que nous venons d'indiquer est due à Otto de Guericke, l'inventeur de la machine pneumatique.

Si l'air contenu dans un vase est pesant; si son poids est susceptible d'être évalué au moyen d'une balance sensible, l'immense volume d'air qui repose sur le sol doit presser celui-ci en proportion de sa masse, et cette pression, sans aucun doute énorme, doit se manifester par des phénomènes sensibles. C'est ce qui arrive en effet; mais avant d'étudier

ces phénomènes, disons quelques mots des propriétés des gaz, tant de celles qui leur sont communes avec les liquides, que de celles qui les caractérisent d'une façon spéciale.

Comme les liquides, les gaz sont formés de parties, de molécules qui glissent les unes sur les autres avec une extrême facilité. Aussi voit-on les masses gazeuses céder aux moindres efforts, se diviser pour laisser tous les mouvements des corps liquides ou solides s'effectuer dans leur sein, et ne leur opposer de résistance sensible, que lorsque la

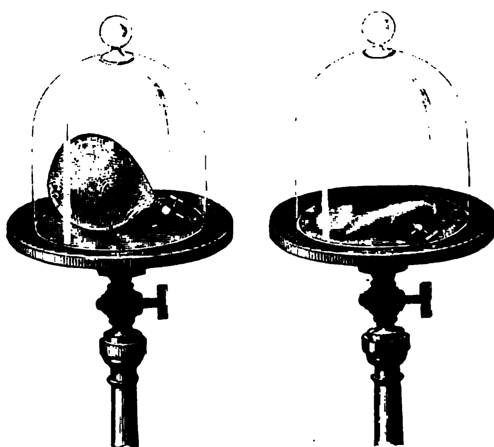


Fig. 58. — Expansibilité et compressibilité des gaz.

vitesse et le déplacement de leurs molécules deviennent considérables.

Les gaz sont éminemment élastiques et expansibles. Prenons en effet une vessie aplatie et comprimée, ne renfermant dès lors qu'un faible volume d'air en comparaison de la capacité que posséderait la même vessie gonflée (fig. 58). En cet état, l'air intérieur n'augmente pas de volume, parce que la force élastique dont ses molécules sont douées, et que nous allons mettre en évidence, est équilibrée par la pression de l'air extérieur. Plaçons cette vessie sous la cloche d'une machine pneumatique. A mesure que le vide se fait, on voit la vessie augmenter de volume, se gonfler et même se rompre

sous la pression intérieure qui en distend les parois. Fait-on rentrer l'air, elle revient promptement à son volume primitif, ce qui prouve à la fois que l'air — un autre gaz se conduirait de même — est *élastique* et *compressible.*

Ces deux propriétés se vérifient aussi à l'aide du *briquet pneumatique.* En enfonçant un piston bien calibré et graissé dans un tube de verre plein d'air (fig. 59), on éprouve une résistance faible mais croissante, et l'on voit le volume de l'air diminuer de moitié, des deux tiers, etc., première opération qui prouve la grande compressibilité du gaz. Le piston, parvenu au bas de sa course et abandonné à lui-même, remonte spontanément à sa position primitive, preuve non moins évidente de l'élasticité de l'air.

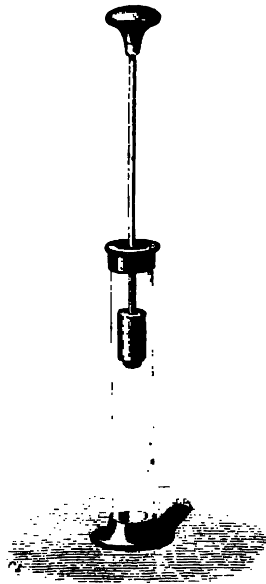


Fig. 59. — Briquet pneumatique.

Comme cette compression dégage de la chaleur, on se sert de cet instrument pour allumer un morceau d'amadou placé au-dessous du piston ; seulement la compression doit alors être très-brusque. De là, le nom de briquet donné à ce petit instrument.

Ainsi, comme les liquides, les gaz sont élastiques et compressibles : mais, tandis que cette dernière propriété est très-faible dans les premiers, elle est au contraire extrêmement considérable chez ceux-ci.

Notons en outre que si les molécules liquides ont une cohésion presque nulle, dans les gaz, les molécules ont une tendance à se repousser qui n'est contrebalancée que par une pression étrangère. Il résulte de là que cette pression venant à diminuer, le volume de gaz augmente : dans les liquides, le volume reste constant, tant du moins que le corps conserve le même état.

Enfin, ce qui distingue encore les liquides des gaz, c'est la très-faible densité comparative de ces derniers : tandis que le poids d'un litre de liquide s'élève à 13 596 grammes, poids d'un litre de mercure, et ne s'abaisse point au-dessous de 715 grammes, éther, le poids d'un litre de gaz ou de vapeur ne dépasse pas 20 grammes et s'abaisse à 9 centigrammes.

Du reste, dans les gaz comme dans les liquides, le principe d'égalité de pression et celui de l'égalité de transmission des pressions dans tous les sens, sont également indiqués par la théorie et vérifiés par l'expérience ; nous aurons l'occasion d'en donner bientôt des exemples. Revenons aux phénomènes dus à la pesanteur de l'air.

§ II. PRESSION ATMOSPHÉRIQUE.

Nous avons vu que Galilée est le premier qui ait soupçonné cette pression : l'histoire de cette importante découverte est bien connue. C'était en 1640. Des fontainiers de Florence, chargés de construire une pompe dans le palais du grand-duc, furent fort étonnés que l'eau, malgré le bon état où ils avaient mis l'appareil, ne voulût pas s'élever jusqu'à l'extrémité supérieure du tuyau du corps de pompe, c'est-à-dire au delà de 32 pieds ($10^{m},3$ environ). Les savants, ingénieurs et académiciens florentins, consultés sur cette anomalie, ne surent que répondre. On s'adressa à Galilée âgé alors de 76 ans, et dont l'immense réputation de savoir n'avait point été ébranlée par les persécutions. Galilée fit d'abord une réponse évasive, mais la question posée le fit réfléchir ; il soupçonna que la pression de l'air était la cause qui fait monter l'eau jusqu'à cette hauteur, et que l'*horreur de la nature pour le vide* était une explication oiseuse, puisqu'il eût fallu supposer que cette horreur ne se manifestait pas au delà d'une hauteur donnée. Il vérifia d'abord la pesanteur de l'air, en pesant une bouteille dont l'air avait été expulsé par la vapeur provenant

de l'ébullition d'une certaine quantité d'eau. Puis il laissa à son disciple Torricelli le soin de pousser plus loin la vérification de ses conjectures.

Un an après la mort de Galilée, Torricelli eut l'idée d'examiner comment se comporterait dans le vide un liquide beaucoup plus dense que l'eau, le mercure.



Fig. 60. — Expérience de Torricelli.



Fig. 61. — Expérience de Torricelli; effet de la pesanteur de l'atmosphère.

Il prit un long tube fermé par un bout, qu'il emplit de ce liquide; puis, fermant avec le doigt l'extrémité ouverte du tube, de manière à empêcher le liquide de tomber et l'air de pénétrer, il plongea cette extrémité dans un vase plein de mercure; abandonnant alors le liquide à lui-même, il maintint le tube dans une position verticale (fig. 60 et 61). Torricelli vit alors le liquide descendre du sommet, et après

quelques oscillations s'arrêter à un niveau qui demeura à peu près invariable, à 28 pouces (76 centimètres) au-dessus du niveau du mercure dans le vase.

Si l'idée de Galilée était juste, et que la colonne d'eau de 32 pieds fût bien maintenue par la pression de l'atmosphère, la même pression devait élever le mercure, 13 fois et demie plus lourd que l'eau, à une hauteur 13 fois et demie moindre. Or, 28 pouces est en effet une longueur 13 fois et demie moindre que 32 pieds.

Telle est, dans sa simplicité, cette grande découverte ; tel est le tube de Torricelli, ou, comme on le nomme de nos jours, le *baromètre*, instrument servant à mesurer la pression de l'atmosphère.

Ce ne fut pas sans résistance que les explications de Torricelli sur l'élévation de l'eau et du mercure triomphèrent auprès des savants de son époque. Mais de nouvelles expériences imaginées par Pascal ne permirent plus aucun doute. Il se dit que si la pesanteur de l'air est réellement la cause des phénomènes observés, la pression devait être moindre à mesure qu'on s'élèverait dans l'atmosphère, et que la colonne gazeuse superposée au niveau extérieur du liquide serait moindre. La hauteur du mercure dans le tube de Torricelli doit donc être plus petite au sommet d'une montagne que dans la plaine. De là, les expériences célèbres qu'il fit faire à Périer, son beau-frère, sur le Puy-de-Dôme, et celles qu'il exécuta lui-même au bas et au sommet de la tour Saint-Jacques la Boucherie. Les résultats furent de tout point conformes aux prévisions tirées de la théorie nouvelle [1].

1. « J'ai imaginé, écrivait Pascal à Périer, une expérience qui pourra lever tous les doutes, si elle est exécutée avec justesse. Que l'on fasse l'expérience du vide plusieurs fois, en un même jour, avec le même vif-argent, au bas et au sommet de la montagne du Puy qui est auprès de notre ville de Clermont. Si, comme je le pense, la hauteur du vif-argent est moindre en haut qu'en bas, il s'ensuivra que la pesanteur ou pression de l'air est la cause de cette suspension, puisque, bien certainement, il y a plus d'air qui pèse sur le pied de la montagne que sur son sommet, tandis qu'on ne saurait dire que la nature abhorre le vide en un lieu plus qu'en l'autre. »

La hauteur du mercure dans le tube de Torricelli est indépendante du diamètre du tube, pourvu toutefois que ce diamètre ne soit pas très-petit; car alors, d'autres forces que nous étudierons ont une grande influence sur les niveaux des liquides. Ce résultat est une conséquence toute naturelle de l'égale transmission des pressions dans les liquides : la colonne de mercure agit par son poids sur tout le mercure de la cuvette, de sorte que chaque élément de surface égal à la section du tube est pressé également par ce poids. Et comme il est en équilibre, c'est que la pression de l'air sur ce même élément est précisément égale à la première.

Que faut-il conclure de là ? C'est que la masse de l'atmosphère pèse sur la surface du sol, comme si cette surface était partout recouverte d'une couche de mercure d'environ 76 centimètres de hauteur.

Ajoutons que la pression dans l'air se transmettant également et dans tous les sens, le poids de l'atmosphère se fait sentir partout où l'air pénètre et reste en communication avec l'atmosphère même, à l'intérieur des maisons, des cavités, comme à l'air libre et sur la périphérie des corps. C'est ce qui explique pourquoi tous les corps situés sur le sol ne sont point écrasés par cette énorme pression qui n'est pas, en moyenne, moindre de 10 333 kilogrammes sur chaque surface d'un mètre carré.

La surface du corps humain étant à peu près d'un mètre carré et demi, pour une personne de moyenne taille et de moyenne corpulence, chacun de nous supporte en tout temps une charge qui vaut environ 15 500 kilogrammes. Que cette charge ne nous écrase pas sur le sol, nous venons d'en donner la raison : toutes les pressions exercées sur chaque point de notre corps se font équilibre. Mais, que nous ne soyons pas broyés sous l'effort de ces pressions contraires, c'est ce qui semble au premier abord incompréhensible. La raison en est simple : tous les fluides contenus dans notre organisme réagissent contre la pression de l'atmosphère, et c'est cette

incessante réaction qui explique l'insensibilité naturelle où nous sommes, et l'absence des phénomènes que la pression de l'air ferait tout d'abord supposer. Cette réaction n'est d'ailleurs pas une simple hypothèse, comme le prouve l'application des ventouses. Ce sont de petits vases en métal ou en verre, qu'on applique sur la peau; le vide étant fait à leur intérieur, la peau se gonfle, les petites veines crèvent, et le sang afflue, parce qu'il n'est plus maintenu dans les vaisseaux par la pression atmosphérique.

On fait dans les cours de physique, pour rendre évidente l'énergie de la pression atmosphérique, quelques expériences intéressantes que nous allons rapidement décrire.

L'une des plus anciennement connues est celle des deux hémisphères de Magdebourg; elle est due à Otto de Guerike.

Deux hémisphères en cuivre pouvant s'emboîter l'un dans l'autre, de manière à former une sphère creuse, s'adaptent par un robinet au conduit de la machine pneumatique (fig. 62). Tant qu'ils sont pleins d'air, il suffit du plus léger effort pour les séparer. Mais quand le vide est fait à l'intérieur de la sphère, il faut un effort considérable pour déterminer la séparation, comme il est aisé de s'en rendre compte, puisque la pression sur deux hémisphères de 2 décimètres seulement de diamètre est déjà sur chacun d'eux de 324 kilogrammes. Dans une de ses expériences, l'illustre bourgmestre de Magdebourg fit tirer chaque hémisphère par quatre forts chevaux sans parvenir à les séparer: le diamètre étant de 65 centimètres, la pression était de 3428 kilogrammes. La pression totale sur les hémisphères est plus grande que ne le marquent ces nombres; mais il ne s'agit ici que de la somme de celles qui s'exercent dans la direction de la résistance, lesquelles équivalent de chaque côté à la pression sur un cercle de même diamètre que la sphère.

L'expérience du crève-vessie consiste à faire le vide dans un vase dont l'ouverture a été recouverte d'une mem-

brane tendue, qui empêche l'air d'y pénétrer. A mesure que



Fig. 62. — Hémisphères de Magdebourg.



Fig. 63. — Expérience du crève-vessie.

le vide se fait, on voit la membrane se déprimer sous le poids de l'air extérieur, et à la fin elle finit par se briser (fig. 63).



Fig. 64. — Jet d'eau dans le vide.

Une forte détonation, semblable à celle d'un coup de pistolet, accompagne la rupture : cette détonation est due évi-

demment à la rentrée subite de l'air dans la capacité vide du vase.

Un fruit, une pomme par exemple appliquée sur le contour aminci d'un tube métallique à l'intérieur duquel on fait le vide, pressée par le poids de la colonne atmosphérique, est coupée par les bords du tube et pénètre ainsi à l'intérieur. C'est l'expérience du *coupe-pomme*.

Enfin, on fait encore une expérience curieuse qui démontre la pression de l'air sur la surface des liquides. Une cloche cylindrique en verre, montée sur une garniture mécanique, est munie d'un tube à robinet qui permet de la visser sur la machine pneumatique et de faire le vide à son intérieur. Le vide fait, on plonge l'extrémité inférieure du tube dans une cuvette remplie d'eau, et l'on ouvre le robinet qui permet la communication de l'intérieur du vase avec le liquide. La pression atmosphérique qui s'exerce sur l'eau de la cuvette fait alors jaillir un jet qui va frapper les parois supérieures de la cloche (fig. 64).

§ III. LE BAROMÈTRE.

Dans tout ce qui précède, nous avons supposé que le poids de la colonne d'air était la seule cause de la pression atmosphérique, que cette pression était constante et équivalait, sur une surface donnée, au poids d'une colonne d'eau de 10 mèt. 33 ou à celui d'une colonne de mercure de 76 centimètres, ayant même section que la surface. Mais l'expérience prouve que cette pression est sujette à des variations, même quand l'altitude du lieu ne change pas. Nous étudierons plus tard ces variations dans leur rapport avec les phénomènes météorologiques; mais il faut pour cela posséder un instrument qui les constate. Cet instrument, qui en principe n'est autre que le tube de Torricelli, et qu'on nomme le *baromètre*, mérite d'être décrit en détail. Il a reçu des dispositions diverses, selon l'usage auquel il est destiné, et dans le but de rendre ses indications précises.

Le plus simple et en même temps le plus exact des baromètres n'est autre chose qu'un tube de verre ou de cristal, qu'on choisit bien droit, régulièrement cylindrique et parfaitement homogène, d'un diamètre un peu grand, de 2 à 3 centimètres, par exemple. On le plonge, après l'avoir rempli de mercure, dans une auge en fonte remplie du même liquide. L'auge et le tube sont fixés contre un support vertical, et restent à demeure dans le lieu où doivent se faire les observations. Ce n'est pas autre chose, on le voit, qu'un tube de Torricelli. Mais pour l'établir on prend diverses précautions dont l'importance est aisée à saisir, et qui du reste sont également nécessaires pour la construction des autres baromètres.

Ainsi il est essentiel que le mercure employé soit d'une grande pureté : on y parvient en dissolvant l'oxyde de mercure ou les parcelles de métaux hétérogènes, à l'aide de l'acide azotique. Il faut aussi et surtout qu'il ne contienne pas de bulles d'air, que leur légèreté spécifique ferait monter le long des parois du tube dans l'espace vide qu'on nomme la *chambre barométrique.* La vapeur d'eau et l'air, étant des gaz élastiques, presseraient le niveau supérieur du tube, de sorte que la hauteur du mercure n'indiquerait plus la pression de l'atmosphère. Pour cela, on commence par sécher et parfaitement nettoyer le tube avant de l'emplir. Une fois qu'il est plein de mercure, on fait bouillir le liquide sur des charbons ardents, jusqu'à ce que toutes les bulles d'air qu'il contient soient expulsées. A ce moment l'aspect du mercure doit être celui d'un miroir de la plus grande netteté; l'éclat vif et métallique dont il brille est un indice d'une pureté parfaite, indispensable en pareille circonstance.

La grandeur du diamètre du tube qui forme le baromètre *fixe* ou *normal*, offre sur les tubes plus étroits l'avantage de donner à la colonne mercurielle un niveau que n'altèrent point les forces moléculaires, ce qu'on nomme la capillarité. Dès lors, pour obtenir la hauteur du baromètre, il suffira de mesurer la dis-

tance verticale qui sépare ce niveau de celui du mercure dans la cuvette. C'est ce qu'on fait à l'aide d'un instrument spécial appelé cathétomètre, qui se compose essentiellement d'une règle divisée, sur laquelle se meut une lunette horizontale.

On peut voir, sur la figure 65 qui représente le baromètre fixe, une vis à double pointe adaptée à la cuvette. La pointe inférieure doit affleurer le mercure, ce qu'il est aisé de réaliser à l'aide de la vis, et c'est la distance de la pointe supérieure — pointe que le dessinateur a oublié de figurer — au niveau du tube, que donne le cathétomètre. En y ajoutant la longueur constante de la vis, on a la hauteur ou la pression atmosphérique cherchée.

Le baromètre à cuvette se distingue du précédent en ce que la cuvette en verre dans laquelle plonge le tube (fig. 66), offrant une grande surface, le niveau du mercure y est considéré comme constant. La planche contre laquelle l'instrument est fixé, est munie d'une échelle divisée en millimètres, sur laquelle glisse un anneau curseur qu'on place de manière que son arête supérieure affleure au niveau du mercure. Le zéro de l'échelle étant par hypothèse le niveau de la cuvette, la lecture de la hauteur se fait sur l'échelle même. Enfin, l'échelle est munie d'un vernier qui permet d'apprécier les fractions de millimètres.

Ce qui rend cet instrument moins parfait que le précédent, c'est que le niveau de la cuvette ou le zéro de l'échelle est supposé constant : or, sous l'influence des variations de la chaleur, le verre et le mercure se dilatent, ce qui produit des variations dans la position variable du zéro. Le plus souvent, après un certain temps, ces variations accidentelles finissent par déterminer une altération permanente, et l'échelle est à rectifier.

On construit aussi des *baromètres à siphon*, ou à deux branches recourbées, dont la plus petite a un diamètre beaucoup plus large que l'autre (fig. 67); mais l'inconvénient dont

nous venons de parler y est encore plus sensible, à moins qu'on ne s'astreigne à prendre toujours pour hauteur la différence des niveaux du mercure dans les deux branches.

Les baromètres de Fortin, de Gay-Lussac et de Bunten n'of-



Fig. 65. — Baromètre normal ou fixe.



Fig. 66. — Baromètre à cuvette ordinaire.



Fig. 67. — Baromètre à siphon ordinaire.

frent pas ces inconvénients. Mais comme ils sont principalement construits dans le but d'être aisément transportables, le diamètre du tube est moins large que dans le baromètre fixe, de sorte que la capillarité déprime le niveau supérieur du mercure. Les observations qu'on fait avec ces instru-

ments exigent donc une correction relative à ce genre d'influence.

Mais, dans les baromètres de Gay-Lussac et de Bunten, comme dans le baromètre fixe, la hauteur se mesure par deux lectures correspondant aux deux niveaux du liquide, de sorte que la différence exprime, toutes corrections faites, la véritable pression atmosphérique. Dans celui de Fortin, le zéro est maintenu constant par une disposition ingénieuse que la figure 68 fera aisément comprendre.



Fig. 68. — Cuvette du baromètre de Fortin.

On y voit une coupe de la cuvette cylindrique qui renferme le mercure où la partie effilée du tube vient plonger. La partie supérieure du cylindre est en verre et laisse voir le niveau du liquide. Une pointe métallique intérieure indique la position du zéro de l'échelle et le niveau que doit atteindre le mercure, toutes les fois qu'il s'agit de faire une observation. Comme le mercure repose sur un sac en peau imperméable lié aux parois inférieures de la cuvette, et que le fond métallique se trouve traversé par une vis dont l'extrémité appuie sur ce sac mobile, il en résulte qu'on peut à volonté monter ou baisser le fond du liquide, ou, ce qui revient au même, élever ou abaisser le niveau, et enfin obtenir l'affleurement. En voyage, pour que les mouvements du mercure ne brisent pas le tube, on monte la vis, jusqu'à ce que la cuvette soit entièrement pleine à sa partie supérieure.

Comme tout l'appareil est enveloppé d'un cylindre de bronze qui le garantit des chocs, le niveau du mercure dans le tube s'observe à travers deux fentes longitudinales opposées qui laissent à nu le verre du tube ; c'est sur les arêtes de ces fentes, que se trouvent gravées les divisions en millimè-

tres de l'échelle, qui a son zéro au niveau constant marqué par la pointe de la cuvette. Un curseur, muni d'un vernier et d'un bouton qui permet de le mouvoir à l'aide d'une crémaillère, donne la position précise du niveau sur l'échelle, et la



Fig. 69. — Le baromètre de Fortin ; installation en voyage.

hauteur en dixièmes de millimètre. A l'aide d'un pied à trois branches, l'appareil s'installe sur le sol, et l'on doit toujours avoir soin de placer le tube dans une position verticale, ce qui est rendu aisé par son mode de suspension dit à la *Cardan* (fig. 69).

Le baromètre de Fortin est commode pour les explorations scientifiques, parce que l'air ne peut s'y introduire, et les mouvements et les agitations de la route ne risquent guère de le briser. Les lectures doivent être corrigées de la capillarité. De plus, comme le degré de température fait varier la densité du liquide et par suite la hauteur de la colonne qui mesure la pression atmosphérique, il faut encore faire une correction relative à cette influence.



Fig. 70. — Baromètre de Gay-Lussac, modifié par Bunten.

La figure 70 montre quelle est la disposition du baromètre de Gay-Lussac modifié par Bunten. Deux portions d'un même tube sont reliés par un tube de diamètre très-étroit ou capillaire. Une petite ouverture laisse pénétrer l'air au-dessus du niveau inférieur. Pour noter la hauteur barométrique, on mesure, sur une échelle divisée en millimètres, la hauteur du niveau supérieur, et l'on en soustrait la hauteur du niveau inférieur : la différence exprime évidemment la pression cherchée. Comme les tubes ont même diamètre, Gay-Lussac avait pensé qu'il serait inutile de corriger l'influence de la capillarité ; malheureusement, on a reconnu que cette influence n'était pas la même dans le vide barométrique et dans le tube inférieur au contact de l'air. Cette circonstance est fâcheuse : l'instrument est facile à transporter, peu volumineux, et l'air peut difficilement pénétrer dans la chambre barométrique à cause du faible diamètre du tube intermédiaire. En voyage, on le retourne de haut en bas. La modification imaginée par Bunten rend plus difficile encore l'introduction de l'air ; les bulles, s'il en pénètre le long des parois du tube, vont se loger dans un espace étroit ménagé dans la partie renflée du tube capillaire, et n'ont aucune action sur le niveau du mercure.

On sera peut-être curieux de savoir par quelle disposition les variations de la pression atmosphérique peuvent se trans-

mettre à une aiguille mobile sur un cadran divisé. Le *baromètre à cadran* n'a pas grande valeur scientifique, parce qu'il est rarement construit avec une précision suffisante : on s'en sert dans les appartements comme objets d'ornement. Il se compose d'un tube à siphon, dont la branche ouverte (fig. 71) supporte un flotteur en ivoire. Ce flotteur monte



Fig. 71. — Baromètre à cadran.

et descend en faisant tourner, au moyen d'un fil de soie, ou quelquefois d'une crémaillère, une poulie à l'axe de laquelle l'aiguille est fixée. L'aiguille tourne dans un sens ou dans l'autre, suivant que le niveau monte ou descend ; le cadran est divisé par comparaison avec un baromètre fixe.

Depuis quelques années, on a substitué avec avantage à ces instruments les baromètres métalliques ou *anéroïdes*.

Ces derniers baromètres sont basés sur l'élasticité de flexion des métaux contournés en lames minces. Un tube aplati en laiton, dont la section est elliptique, est vide d'air et rigoureusement fermé (fig. 72). Il est courbé en forme d'arc de cercle et fixé en son point milieu, de sorte que les extrémités libres des deux moitiés du tube peuvent osciller de part et d'autre du point fixe. Quand la pression barométrique augmente, le tube s'aplatit davantage, la courbure des deux arcs s'accroît, et leurs extrémités libres se rapprochent : le phénomène in-



Fig. 72. — Baromètre anéroïde de Bourdon.

verse a lieu si la pression diminue. Or les extrémités libres du tube s'articulent à des leviers qui font mouvoir la tige d'un secteur à engrenage. L'aiguille du cadran qui s'engrène elle-même par un pignon au secteur, se meut dans un sens ou dans l'autre, et parcourt de la sorte les divisions du cadran qui ont été réglées par comparaison avec un baromètre fixe.

Dans le baromètre anéroïde que représente la figure 73, la pression de l'air s'exerce sur la base cannelée d'un tambour en maillechort à l'intérieur duquel on a fait le vide. Quand la pression augmente, cette base s'affaisse ; elle se relève au contraire si la pression diminue, et ses mouvements se trans-

mettent à l'aiguille par un mécanisme particulier dont la description détaillée est ici superflue. L'invention de ce baromètre est due à M. Vidi. Il a été récemment perfectionné par un opticien anglais, M. Cooke.

Ce genre de baromètre est préférable de beaucoup aux ba-



Fig. 73. — Baromètre anéroïde de Vidi.

romètres à cadran, bien qu'on ait reconnu la nécessité de modifier de temps à autre la graduation, à cause des variations que subit l'état moléculaire du tube dans le baromètre Bourdon, ou celui de la caisse métallique et d'un ressort antagoniste dans le baromètre de Vidi.

CHAPITRE VII.

PESANTEUR DE L'AIR ET DES GAZ.

§ I. LES POMPES. — LE SIPHON.

La découverte de la pesanteur de l'air et de la pression atmosphérique remonte seulement, nous l'avons vu plus haut, à un peu plus de deux siècles. Mais, bien avant Toricelli et Galilée, l'application du principe avait devancé la théorie, comme le prouve le récit même que nous avons donné et que nous a transmis l'histoire. C'est en effet la pression de l'air qui est la cause du mouvement ascensionnel de l'eau dans les pompes. Or, on attribue généralement l'invention de ces appareils si utiles à Ctesibius, géomètre et mécanicien célèbre qui vivait à Alexandrie 130 ans avant J.-C., ou un siècle environ après Archimède.

Nous allons décrire sommairement les divers instruments connus sous le nom de pompes, qu'ils aient pour objet le mouvement des liquides ou celui des gaz, mais en nous attachant ici particulièrement à l'explication du jeu des appareils : nous renverrons au volume qui traitera des applications de la physique, la description plus détaillée de ceux qui ont, dans les arts industriels, une destination spéciale.

Prenons un cylindre creux, dans lequel peut se mouvoir à frottement un piston muni d'une tige, et dont le fond est percé d'un orifice (fig. 74). Le piston se trouvant au bas du cylindre, plongeons l'instrument dans un vase ou réservoir plein d'eau; puis, élevons le piston à l'aide de sa tige. Que va-t-il

arriver ? C'est que l'espace vide d'air, que le piston laisse au-dessous de lui dans sa marche ascendante, se remplira d'eau, d'abord jusqu'à ce que le niveau de l'eau soit le même dans le cylindre que dans le réservoir, ce qui aurait lieu en vertu du principe d'équilibre des liquides dans les vases communiquants, quand bien même il y aurait de l'air sous le piston. Mais l'eau monte encore au-dessus de ce niveau, en suivant instantanément le piston dont elle touche sans cesse la section inférieure ; et il est aisé de comprendre que son mouvement est dû à la pression que l'air extérieur exerce sur la surface liquide du réservoir.



Fig. 74. — Principe de la pompe aspirante.

Supposons que le cylindre ait plus de 10 m. 33 d'élévation et que le réservoir contienne une quantité d'eau suffisante : la colonne liquide augmentera de hauteur, jusqu'à ce qu'elle atteigne 10 m. 33 environ. A ce moment, son poids fait équilibre à la pression de l'atmosphère : si le piston continue à monter, l'eau s'arrêtera. C'est précisément là l'obstacle que rencontrèrent les fontainiers de Florence, et qui fit croire aux physiciens de la cour du grand-duc que la nature cessait d'avoir *horreur du vide* au delà de 32 pieds.

Telle est, dans son principe, la pompe à laquelle on donne le nom de *pompe aspirante*, parce que le piston semble aspirer le liquide, à mesure qu'il monte. Voici maintenant comment est généralement disposé l'appareil pour remplir l'objet auquel on le destine, c'est-à-dire pour déverser l'eau une fois qu'elle est élevée à une certaine hauteur au-dessus du niveau du réservoir.

Le cylindre, ou *corps de pompe*, est muni d'un tuyau cylindrique d'un plus petit diamètre, dont l'extrémité inférieure

plonge dans le réservoir. A l'orifice de séparation est adaptée une soupape qui s'ouvre de bas en haut. Le piston est lui-même traversé par une ou plusieurs ouvertures, munies de soupapes dont le jeu a lieu dans le même sens que la première (fig. 75). On comprendra maintenant ce qui doit se passer lorsqu'on donne au piston un mouvement alternatif dans le corps de pompe. A sa première ascension, le vide se fait au-dessous de lui. L'air du tuyau d'aspiration soulève la soupape par sa pression, et l'eau monte à une certaine hauteur. Quand le piston redescend, l'air qui s'est introduit dans le corps de pompe est comprimé : d'une part, sa pression ferme la soupape inférieure, de l'autre, elle soulève les soupapes du piston et le gaz s'échappe au dehors. A chaque mouvement semblable, l'eau s'élève de plus en plus, et finit par venir en contact avec la paroi inférieure du piston et par passer au-dessus de sa face supérieure. La pompe est amorcée. Il est facile de voir alors comment l'eau doit s'écouler au dehors par un orifice latéral pratiqué à la partie supérieure du corps de pompe. D'ailleurs, une fois la pompe amorcée, quand le piston monte, le vide se fait au-dessous de lui, et l'eau ne cesse de presser contre sa face inférieure. La soupape du tuyau d'aspiration reste constamment ouverte, et l'ascension de l'eau est déterminée par le mouvement de bas en haut du piston.

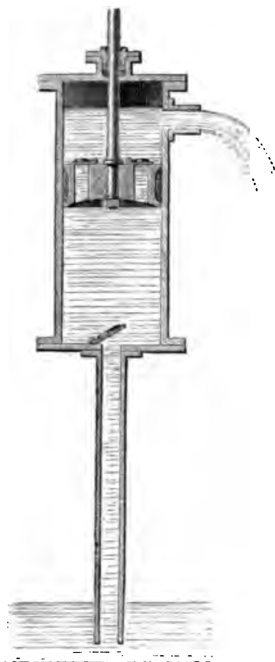


Fig. 75. — Pompe aspirante.

Les efforts nécessaires pour élever ou abaisser le piston quand la pompe est amorcée, sont faciles à évaluer. Si le piston descend, ses propres soupapes sont ouvertes ; les pressions transmises à ses deux faces par le liquide sont

égales de part et d'autre, et par conséquent se détruisent, et les seules résistances qu'on éprouve proviennent des frottements du liquide et du piston. Mais si le piston s'élève, la pression atmosphérique est seule annulée, puisqu'elle s'exerce sur le réservoir d'une part, sur le niveau supérieur du liquide d'autre part, et l'effort à faire est évalué par le poids d'une colonne d'eau ayant pour base la surface du piston et pour hauteur la distance verticale des deux niveaux du liquide. Si par exemple, cette distance est de 2 mètres, et que la base du piston soit de 1 décimètre carré, c'est une force de 20 kilogrammes qu'il faudra employer pour soulever le piston, sans compter les résistances dues au frottement.

L'expérience montre qu'on ne peut donner à la pompe aspirante une profondeur ou hauteur de plus de 7 à 8 mètres, au lieu de 10 mèt. 33 qu'indique la théorie. La raison de cette imperfection est dans les fuites d'air et d'eau qui existent toujours entre le corps de pompe et le piston ; en outre, l'eau du réservoir contient presque toujours de l'air en dissolution et cet air se dégage du liquide, parce qu'il se trouve en contact avec un espace où la pression est très-faible.

Dans la *pompe foulante* (fig. 76), le corps de pompe plonge dans l'eau, de sorte que le liquide s'y introduit par simple communication. De plus, le piston est plein, et le tuyau qui sert à élever l'eau, partant de la partie inférieure du corps de pompe, est muni, à l'orifice de séparation, d'une soupape qui s'ouvre de dedans en dehors. Des lors, le piston dans sa marche descendante foule l'eau, dont la pression ferme la soupape du corps de pompe, ouvre au contraire celle du tuyau de conduite et pousse le liquide à l'extérieur.

La pompe *aspirante et foulante* participe des dispositions des deux pompes que nous venons de décrire (fig. 77). L'ascension de l'eau s'y fait par aspiration, et, comme le piston est plein, en descendant il refoule le liquide dans le tuyau latéral de déversement.

Décrivons encore l'instrument que tout le monde connaît sous le nom de *siphon* et qui est d'un grand usage pour trans-

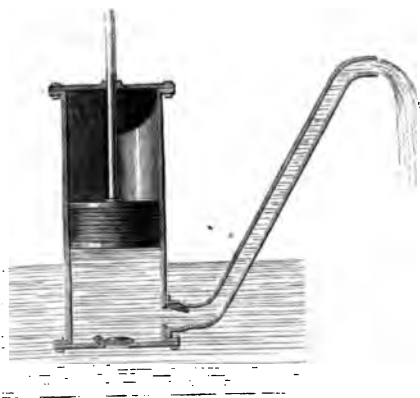


Fig. 76. — Pompe foulante.

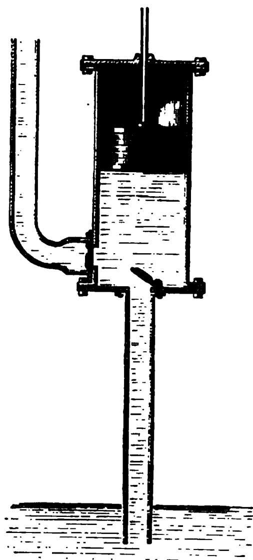


Fig. 77. — Pompe aspirante et foulante.

vaser les liquides d'un vase dans un autre : c'est aussi, comme on va voir, la pression de l'air qui détermine l'écoulement.

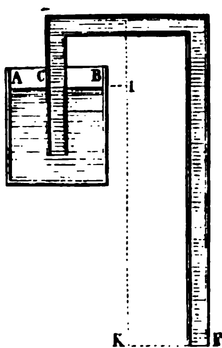


Fig. 78. — Théorie du siphon.

Un tube formé de deux branches recourbées, d'inégales longueurs, est rempli du liquide qu'on veut transvaser, et plongé par sa plus petite branche dans le vase qui contient ce liquide (fig. 79). Aussitôt cette disposition réalisée, on voit le liquide s'écouler par l'orifice de la plus grande branche, tant que la branche la plus courte reste immergée.

Quelle est la cause de cet écoulement continu? Rien n'est plus aisé à comprendre. En effet, à la surface AB du liquide dans le vase, et à l'extrémité inférieure et libre du tube en F, la pression at-

mosphérique s'exerce avec des intensités égales et de sens contraire (fig. 78). Au point C où le tube plonge dans le vase, cette pression sert à élever le liquide dans la plus petite branche, ou à le maintenir dans le tube préalablement rempli; à l'extrémité opposée, la pression de l'air soutient la colonne liquide dans la grande branche, et l'y maintiendrait en équilibre, si le niveau de ces deux points était le même. Il résulte de là, que toute la portion du liquide contenu dans le tube et dépassant le niveau I du



Fig. 79. — Siphon.

vase, reste en équilibre sous l'influence de ces pressions opposées. Il reste donc dans la grande branche du siphon une colonne d'eau de hauteur IK, dont le poids détermine l'écoulement.

On pourrait croire que le liquide de cette colonne une fois écoulé, le mouvement devrait s'arrêter : mais il faut remarquer que les tranches liquides, pour se séparer, devraient laisser au-dessus d'elles un espace vide que la pression exercée sur le liquide du vase par l'atmosphère tend sans cesse à

combler, de sorte qu'en réalité cette séparation n'a pas lieu et l'écoulement est continu.

Les formes des siphons diffèrent, selon l'usage auquel on les destine, et aussi selon la nature du liquide à transvaser.

Il nous reste maintenant, pour terminer l'étude des phénomènes de la pesanteur, à décrire les appareils qui servent à enlever l'air d'un récipient, d'un vase quelconque, ou au contraire à l'y comprimer; puis à dire comment on évalue les pressions des gaz et suivant quelles lois ces pressions varient, quand on fait varier le volume qu'ils occupent.

§. II. DILATATION ET COMPRESSION DES GAZ. — LA MACHINE PNEUMATIQUE.

L'expérience du tube de Torricelli donnait un moyen fort simple de faire le vide, et un vide aussi parfait que possible. Tel est en effet l'espace situé au-dessus de la colonne de mercure, espace auquel on donne le nom de chambre barométrique. Mais, si le procédé est simple, il est loin d'être pratique, puisqu'il nécessiterait l'emploi d'une énorme quantité de mercure, dès que la capacité qu'on voudrait raréfier serait un peu considérable, et qu'à chaque opération, les précautions à prendre seraient fort gênantes. Aussi a-t-on dès longtemps cherché d'autres moyens.

C'est en 1654 que fut imaginée et construite la première machine pneumatique. Otto de Guericke en était l'inventeur, et nous avons cité plusieurs expériences curieuses dues à cet observateur ingénieux. Bientôt elle reçut des perfectionnements importants auxquels Boyle, Papin, Muschenbroek, Gravesande, attachèrent leurs noms. Elle n'était, à l'origine, formée que d'un seul corps de pompe; mais on reconnut la nécessité d'en employer deux, pour annuler la résistance considérable que l'on éprouvait pour la manœuvrer.

Voici quelles sont les dispositions principales. Imaginons deux corps de pompe, munis chacun à sa paroi inférieure d'une soupape qui s'ouvre de bas en haut, et d'un piston percé d'un orifice que ferme une soupape de même sens. Les deux orifices inférieurs communiquent par un canal commun à une plaque bien dressée sur laquelle on pose le récipient, et au centre de laquelle vient aboutir l'orifice du canal dont nous parlons. La figure 80 montre en coupe l'un des corps de pompe, ses deux soupapes et le canal de communication. Le jeu de cette moitié de l'appareil étant bien compris, il sera facile de comprendre leur ensemble.

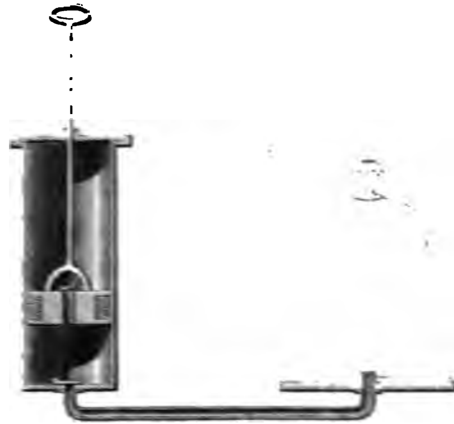


Fig. 80. — Jeu du piston et des soupapes dans la machine pneumatique.

Partons du moment où le piston touche la base inférieure du corps de pompe. La cloche est remplie d'air à la pression atmosphérique. Au moment où on soulève le piston, le vide se fait dans la partie inférieure du corps de pompe. L'air de la cloche qui remplit le canal de communication soulève par sa force élastique la soupape inférieure, et se répand dans le vide. Quant à la soupape du piston, elle est maintenue fermée par la pression de l'air qui s'exerce extérieurement sur toute la surface du piston. Ce passage de l'air de la cloche dans le corps de pompe a lieu, jusqu'à ce que le piston ait atteint sa position la plus élevée. Il est clair qu'en ce moment la quantité d'air contenue dans la cloche a diminué et qu'elle a diminué de moitié, si le volume du corps de pompe est précisément égal au volume du récipient.

Faisons maintenant parcourir au piston un chemin inverse. Au moment où il commence à descendre, la capacité du corps de pompe diminue, la pression de l'air qui s'y trouve contenu

augmente, dépasse celle de l'air du récipient, et la soupape inférieure se ferme. Alors, à mesure que la descente du piston diminue la capacité inférieure, l'air contenu augmente de densité : dans notre hypothèse, cette densité sera redevenue égale à celle de l'air atmosphérique, dès que le piston atteindra la moitié de sa course. Plus loin, la pression intérieure augmente, soulève la soupape du piston, et l'air s'est échappé en totalité à l'extérieur, dès que le piston touche de nouveau la paroi inférieure du cylindre.

Ce seul mouvement de va-et-vient, analysé dans ses effets, comme nous venons de le faire, explique toute la suite de l'opération, puisqu'il a suffi à raréfier de moitié l'air de la cloche. Le gaz qui reste sera raréfié de nouveau à une seconde, puis à une troisième manœuvre, et ainsi de suite. Sa pression deviendra le quart, le huitième, le seizième de la pression primitive, ainsi que nous le verrons bientôt en démontrant la loi de Mariotte. La proportion changerait, bien entendu, si le rapport de capacité du cylindre et du récipient changeait lui-même.

Les figures 81 à 84 vont maintenant expliquer la disposition réelle de la machine, et montrer quelle est l'utilité du second corps de pompe. La première fait voir comment sont disposées les deux soupapes, celle du piston et celle de la partie inférieure du corps de pompe. La soupape du piston est une petite plaque *a*, qu'un ressort à boudin très-léger presse sur l'ouverture, et qui cède dès lors à une très-faible pression en sens inverse. La soupape du corps de pompe, *b*, est conique ; une tige qui passe à frottement dans le piston la soulève ou l'abaisse, mais à une très-faible distance. La figure 82 montre que les tiges des pistons sont formées de crémaillères qui s'engrènent à une roue dentée, de sorte que, par l'aide d'une manivelle à deux bras, on fait à la fois descendre un des pistons et monter l'autre. Grâce à cette disposition, le travail est doublé pour une même manœuvre ; mais, et c'est surtout le but qu'on

s'est proposé, la résistance est réduite à son minimum; car, à mesure que le vide se fait, chaque piston en montant doit soulever la pression atmosphérique qui agit sur sa base, mais d'autre part cette pression aide l'autre piston à descendre. De la sorte, il y a compensation ou équilibre entre ces deux forces qui agissent, il est vrai, dans le même sens, mais dont toute la puissance est vaincue par la résistance de la machine, sans fatiguer l'opérateur.



Fig. 81. — Détail du piston et des soupapes.

Les figures 83 et 84 donnent le plan et la vue extérieure de la machine pneumatique à deux corps de pompe.

On y voit comment le canal commun, qui relie les deux

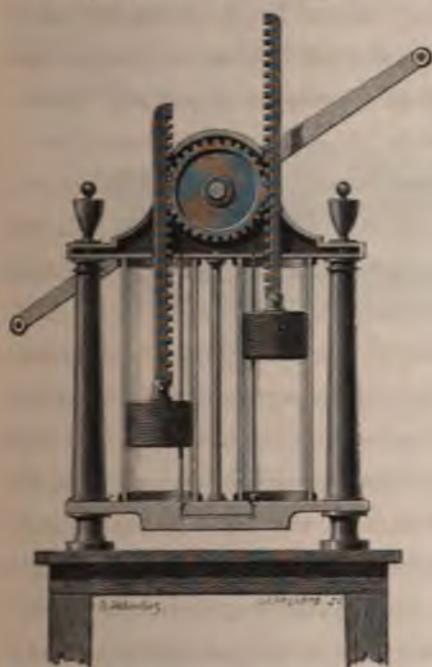


Fig. 82. — Machine pneumatique à deux corps de pompe. Coupe transversale.



Fig. 83. — Plan de la machine pneumatique à deux corps de pompe.

corps de pompe par un tuyau, communique au centre de la *platine :* on nomme ainsi une plaque de verre dépoli, par-

faitement dressée ou plane, sur laquelle on fixe, en enduisant leurs bords de suif, les cloches où l'on veut faire le vide. Si les récipients ont la forme de tubes, de ballons, etc., on les visse au centre de la platine.

Un robinet ajusté vers le milieu du tube de communication est percé de conduits qui permettent, soit d'établir ou de supprimer la communication entre la machine et le récipient,



Fig. 84. — Vue extérieure de la machine pneumatique.

soit de laisser l'air extérieur pénétrer dans les corps de pompe, ou dans la cloche seule.

Sur le trajet du même conduit, on aperçoit un manchon de verre contenant un tube barométrique, ou manomètre, qui sert à indiquer à quel degré le vide est obtenu sous le récipient, c'est-à-dire quelle est la pression de la faible quantité d'air que ce dernier contient encore.

Enfin, les bonnes machines sont munies d'un appareil dont l'invention est due à M. Babinet. C'est un robinet à l'aide

duquel on peut, à l'aide d'un conduit spécial, ne laisser le récipient communiquer qu'avec un seul corps de pompe. L'air qu'il contient encore est refoulé par un autre conduit sous le piston du second corps de pompe, et là, grâce à l'accroissement de pression qui résulte de ce refoulement, il finit par soulever la soupape. Le degré de vide est ainsi reculé à une limite telle, que la pression de l'air qui reste encore dans le récipient est à peine appréciable au manomètre.

La machine pneumatique de M. Bianchi n'a qu'un seul corps de pompe. Mais le piston divise le cylindre en deux compartiments qui alternativement reçoivent et expulsent l'air : c'est, à proprement parler, une pompe à double effet. La figure 85 fera comprendre la manière dont cette pompe fonctionne. Une même tige supporte les deux soupapes coniques mobiles qui se ferment ou s'ouvrent alternativement d'après le jeu du piston, ouvrant ou fermant ainsi la communication de chaque compartiment avec le récipient. L'air du compartiment inférieur, comprimé quand le piston s'abaisse, soulève une soupape maintenue par un ressort à boudins sur l'orifice d'un conduit ménagé dans la tige du piston ; il s'échappe au dehors par ce conduit. L'air du compartiment supérieur s'échappe par une soupape du même genre adaptée au couvercle du corps de pompe. Un système d'engrenage est mis en mouvement par une manivelle ; et comme le corps de pompe a la liberté d'osciller dans un plan vertical, le mouvement alternatif du piston se trouve commandé par un mouvement continu de rotation, dont la vitesse est réglée par un volant très-pesant (fig. 86). Cette machine permet de faire



Fig. 85. — Machine pneumatique de Bianchi ; vue extérieure du corps de pompe.

rapidement le vide dans des récipients dont la capacité s'accroît avec les dimensions du corps de pompe[1].

Nous avons eu déjà plusieurs fois l'occasion de décrire des expériences curieuses faites à l'aide de la machine pneumatique : par la suite, nous en verrons d'autres, relatives aux phénomènes de chaleur, de son, d'électricité. Nous nous contenterons donc d'en indiquer encore quelques-unes qui concernent les phénomènes de pesanteur.

Par exemple, on constate que l'eau contient ordinairement en dissolution de l'air que maintient la pression atmosphérique. Dans le récipient, on voit les bulles d'air attachées aux parois grossir à mesure que la pression diminue, et monter à la surface de l'eau. La fumée qui, dans l'atmosphère, s'élève au-dessus des couches inférieures, tombe dans le vide comme une masse pesante. Ce phénomène montre que le principe d'Archimède est vrai pour les gaz, comme pour les liquides, ainsi que le témoigne une autre expérience qu'on exécute avec un petit appareil, appelé *baroscope*, dont Otto de Guericke est l'inventeur.

Une balance supporte, à chacun de ses deux fléaux, deux boules métalliques, l'une creuse et à parois minces, l'autre pleine et d'un beaucoup plus petit volume : pesées dans l'air, ces deux boules se font exactement équilibre (fig. 87). Quand on porte l'appareil sous le récipient de la machine pneumatique, on voit l'équilibre se troubler dès que le vide se fait, et le fléau pencher du côté de la sphère la plus volumineuse. Cette sphère perdait donc dans l'air une certaine portion de son poids, qu'on sait d'ailleurs être précisément égale au poids de l'air déplacé. Ceci nous prouve que, pour avoir le poids

1. Un habile constructeur, M. Deleuil, a fabriqué une machine pneumatique plus spécialement destinée aux usages industriels, dont le piston ne touche pas les parois du corps de pompe. La mince couche d'air qui reste dans l'intervalle sert de garniture au piston, de sorte que la résistance due au frottement des pistons dans les corps de pompe ordinaires est annulée. M. Deleuil obtient, dans une cloche de 14 litres, un degré de raréfaction mesuré par 3 millimètres seulement.

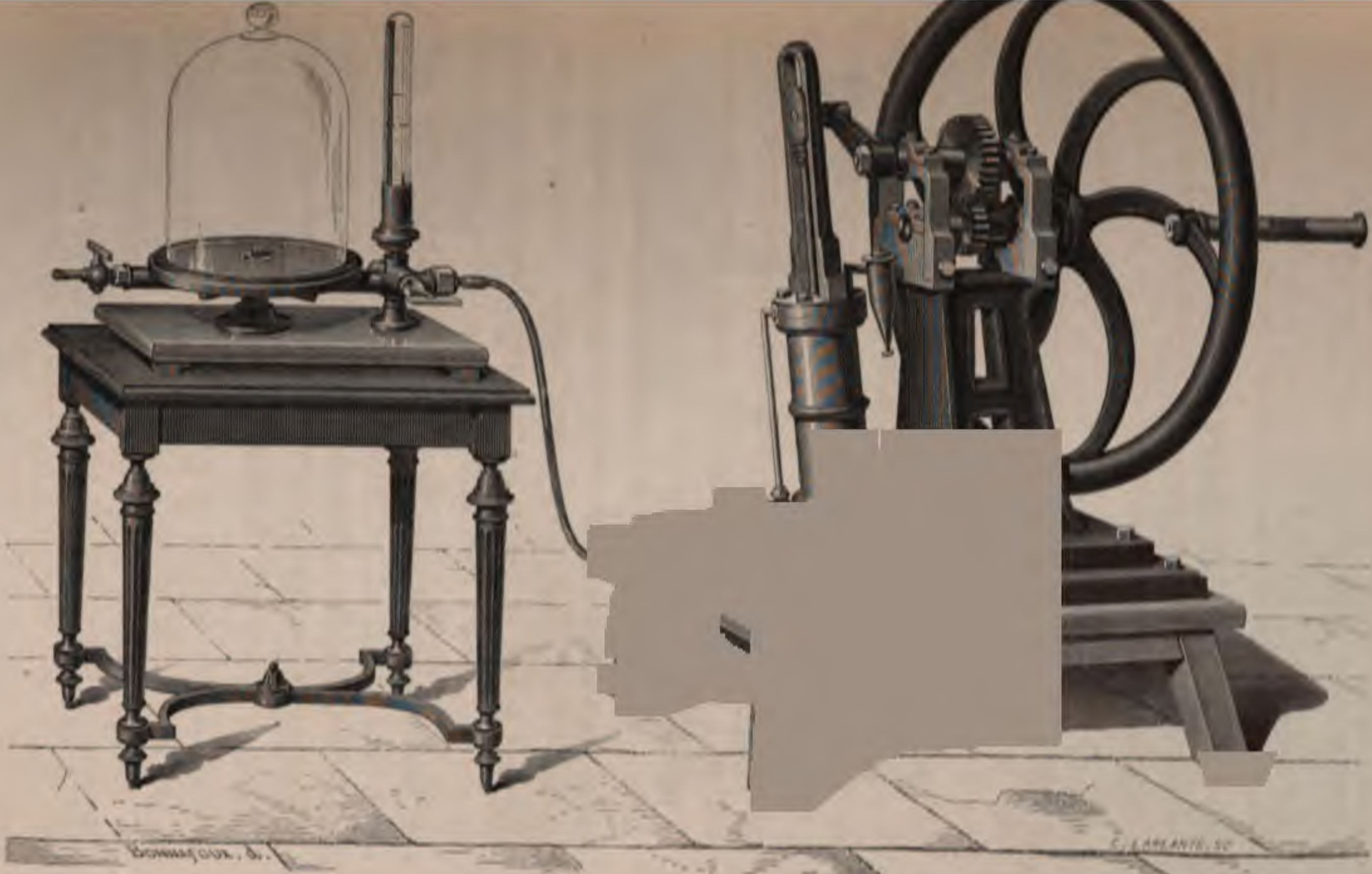


Fig. 86. — Machine pneumatique de Bianchi ; vue d'ensemble.

exact des corps, il est nécessaire de faire les pesées dans le vide, ou du moins de tenir compte de l'erreur occasionnée par la poussée de l'air. Dans les pesées délicates, en chimie, ou pour la détermination précise des densités, cette correction est indispensable.

L'application du principe d'Archimède aux ballons ou aérostats sera l'objet d'une description ultérieure[1].

Au lieu de faire le vide dans un vase ou un récipient, on peut au contraire accumuler, comprimer l'air ou d'autres



Fig. 87. — Le baroscope.



Fig. 88. — Machine de compression; vue intérieure du piston.

gaz. Cette opération se fait avec les pompes ou machines de compression.

On construit des machines de compression absolument pareilles aux machines pneumatiques, ou, du moins, n'en différant que par une modification : toutes les soupapes sont changées de sens. En examinant la figure 88, qui représente la coupe d'une machine de compression, on verra immédiatement quel est le jeu du mécanisme, et comment, au lieu de raréfier ou d'expulser l'air, le mouvement de va-et-vient du piston doit au contraire l'accumuler et le comprimer.

On emploie aujourd'hui de préférence des pompes de com-

1. *Les Applications de la physique.*

pression formées d'un seul corps, à piston massif, et dont les deux soupapes sont placées au fond du cylindre, l'une don-



Fig. 89. — Pompe de compression de Silbermann ; vue extérieure.



Fig. 90. — Pompe de compression de Silbermann ; Coupe.

nant communication avec l'air extérieur, l'autre avec le récipient[1] (fig. 89 et 90). Si l'on veut obtenir une compression

1. La pompe de compression de ce genre, dont nous donnons ci-dessus la coupe et la vue extérieure, est due à un savant dont le mérite égale la modestie, M. J. Silbermann, préparateur du cours de physique au Collége de France. Si la place ne nous manquait, nous dirions comment le robinet, dont on voit la position au-dessous des soupapes, permet de comprimer dans un récipient l'air ou tout autre gaz contenu dans un autre, d'intervertir l'ordre de communication des récipients, ou encore de rétablir entre eux l'équilibre de pression, enfin de faire communiquer chacun d'eux avec l'atmosphère. C'est donc à la fois une machine pneumatique et une pompe de compression.

plus rapide, on se sert de pompes accouplées. La figure 91 montre la disposition générale des appareils de ce genre. M. Regnault s'en est servi pour obtenir de l'air ou de la va-



Fig. 91. — Pompes de compression accouplées.

peur dont la pression équivalait à 30 fois la pression atmosphérique, ou, si l'on veut, capable de supporter une colonne de mercure de 30 fois 76 centimètres, 22 m. 80.

§ III. LOI DE MARIOTTE.

Disons maintenant sur quel principe on s'appuie pour évaluer les pressions des gaz, et quelle loi suivent les varia-

tions de ces pressions, sous l'influence seule du changement de volume.

Cette loi, dont la découverte est due au physicien Mariotte, s'énonce ainsi :

Si une même masse gazeuse est soumise à une série de pressions différentes, les volumes qu'elle occupe successivement varient en raison inverse des pressions qu'elle supporte.



Fig. 92. — Vérification expérimentale de la loi de Mariotte.

Voici la démonstration expérimentale de cette loi :

On prend un long tube recourbé dont la petite branche est fermée et la grande ouverte (fig. 92). S'il est parfaitement cylindrique, l'échelle divisée en parties égales, dont on voit les divisions sur la planchette à laquelle il est fixé, indique pour le tube des capacités égales. S'il n'est pas cylindrique, on le divise lui-même en parties inégales, mais d'égale capacité.

Introduisons une certaine quantité de mercure, et, par des secousses convenables, faisons en sorte que le liquide se répartisse en deux colonnes de même hauteur dont les niveaux correspondent aux zéros des deux échelles. A ce moment, l'équilibre existe entre l'air extérieur qui presse le mercure dans la grande branche ouverte, et l'air intérieur emprisonné dans la branche fermée. La pression de ce dernier est donc de 1 atmosphère.

Versons du mercure dans la grande branche. L'équilibre sera rompu, et le mercure montera dans la branche fermée. Arrêtons-nous au moment où le niveau atteindra la division 12, c'est-à-dire où le volume du gaz sera réduit à moitié. Nous constaterons que la différence des niveaux du mercure sera précisément égale à la hauteur barométrique au moment

de l'expérience. Or il est clair qu'à ce moment, c'est cette différence de niveau qui mesure l'accroissement de pression du gaz emprisonné ; la pression totale est donc de 2 atmosphères.

En versant de nouveau du mercure dans la grande branche, on verra le niveau monter dans la petite branche jusqu'aux divisions 16, 18, 19.2 par exemple, ce qui suppose le volume du gaz réduit au tiers, au quart, au cinquième de son volume primitif. Or, on trouve alors que les pressions sont successivement de 3, 4, 5 atmosphères. En général, les volumes occupés par l'air ou par tout autre gaz varient précisément en raison inverse des pressions que ce gaz supporte : ce qui démontre la loi énoncée. La loi se vérifie avec la même facilité, quand on soumet la masse gazeuse à des pressions décroissantes, inférieures à 1 atmosphère : les volumes augmentent comme les pressions diminuent.

On voit par cette loi, dont l'importance est extrême, combien les gaz sont compressibles et combien ils diffèrent sous ce rapport des liquides dont la compressibilité est renfermée, nous l'avons vu, dans de très-étroites limites.

Dans les expériences qui précèdent, la température est supposée constante.

Si la loi de Mariotte était rigoureusement vraie, il en résulterait que tous les gaz sont doués d'une égale compressibilité, et que cette compressibilité est croissante, quelles que soient les pressions auxquelles on les soumet. Dulong et Arago ont bien vérifié l'exactitude de la loi, pour l'air, jusqu'à 27 atmosphères ; mais M. Despretz et, depuis, M. Regnault, sont arrivés à reconnaître que cette compressibilité n'est pas exactement la même pour tous les gaz, et de plus qu'elle est aussi légèrement variable pour un même gaz. L'air, l'azote, l'acide carbonique se compriment en réalité un peu plus que n'exigerait la loi de Mariotte : le gaz hydrogène s'en écarte en sens contraire. Quant aux gaz susceptibles de passer à l'état liquide, l'écart dont il s'agit a été trouvé d'autant plus considérable

que les expériences ont eu lieu à une température plus voisine de celle où ils se liquéfient. Sans doute, dans le voisinage de cette température, les gaz éprouvent des modifications moléculaires dont on ignore encore la nature, mais qui contrarient les effets dus aux variations de pression.

La mesure de la pression de l'air qui reste sous le récipient de la machine pneumatique, quand on y fait le vide, mesure effectuée, comme nous l'avons vu, à l'aide d'un *manomètre* ou baromètre tronqué, est une application directe de la loi de Mariotte.

LIVRE DEUXIÈME.

LE SON.

CHAPITRE I.

PRODUCTION ET PROPAGATION DU SON.

§ I. LES PHÉNOMÈNES DU SON DANS LA NATURE.

L'absence de tout son, de tout bruit, en un mot le silence absolu, est pour nous synonyme d'immobilité et de mort. Nous sommes tellement habitués à entendre, ne fût-ce que le bruit que nous faisons nous-mêmes, que nous avons peine à concevoir l'idée d'un monde complétement silencieux et muet, comme paraît être la Lune, si l'on en croit les données de l'Astronomie.

Sur la Terre, les phénomènes du son se manifestent à tous les instants de la durée. Certes, il y a sous ce rapport une grande différence entre nos grandes cités, les mille bruits dont les oreilles y sont perpétuellement assourdies, et le murmure doux et confus qu'on entend dans les solitudes des champs, sur les montagnes ou dans les plaines. Quel contraste aussi entre le calme des régions alpestres et des régions polaires où toute vie disparaît, et les rives retentissantes de

chines à vapeur, ne s'interrompt souvent ni le jour ni la nuit. Mais qu'y faire ? Pour notre compte, c'est une musique qui nous semble de tout point préférable à celle de la mousqueterie et du canon sur les champs de bataille, de même que la lutte sur le terrain du travail et de la science nous paraît l'emporter sur les décisions brutales de la force.

Tous les phénomènes que nous venons de passer en revue, quelque variés qu'ils paraissent, se rapportent à un même mode de mouvement, dont il s'agit maintenant d'étudier la nature et de formuler les lois. Commençons par énumérer les diverses manières dont le son peut se produire et se propager dans les solides, dans les liquides et dans les gaz.

§ II. DIFFÉRENTS MODES DE PRODUCTION DU SON.

La *percussion*, ou le choc de deux corps l'un contre l'autre, est un des modes les plus ordinaires de la production du son. Le marteau qui frappe sur l'enclume, le battant qui fait résonner les cloches ou les timbres, les baguettes du tambour, la crécelle et cent autres exemples que le lecteur se rappellera aisément, sont autant de cas particuliers où les sons se trouvent produits par le choc de deux corps solides. On peut obtenir ainsi les bruits et les sons les plus variés, mais nous verrons que cette variété dépend à la fois de la forme et de la nature du corps sonore, et de la façon dont le bruit se propage jusqu'à notre oreille. Dans l'expérience du marteau d'eau, le bruit provient du choc d'une masse liquide contre un corps solide.

Le *frottement* est un autre mode de production du son ou du bruit : c'est ainsi qu'à l'aide d'un archet dont les crins sont enduits d'une résine appelée colophane, on fait résonner les cordes tendues, les cloches de verre ou de métal. Dans ce cas, le frottement est transversal. Mais les sons s'obtiennent aussi par un frottement longitudinal sur des cordes ou des verges

métalliques. Lorsqu'on traîne un objet sur le sol, le bois, les pierres, etc., il en résulte un bruit produit par le frottement : la roue d'une voiture qui roule sur le pavé donne lieu à un bruit qui est dû en grande partie au frottement, mais auquel la percussion n'est pas tout à fait étrangère.

Le pincement d'une corde tendue, par exemple dans les instruments tels que la guitare, la harpe, la mandoline, donne un son dont l'origine participe à la fois de la percussion et du frottement.

Les corps liquides et solides mis en contact par voie de percussion ou de frottement produisent des sons et des bruits, mais les mêmes mouvements dans les liquides, sans l'intermédiaire des corps solides, déterminent aussi des sons : tel est le frémissement que fait entendre la chute des gouttes de pluie à la surface de l'eau d'un bassin, d'une rivière.

Dans les gaz, le son, comme nous le verrons bientôt avec plus de détails, est dû à une série de condensations et de dilatations alternatives ; mais ces mouvements peuvent être produits par la percussion et le frottement. Ainsi, l'air siffle quand il reçoit l'impulsion violente d'une baguette ou d'un fouet ; et le vent produit des sons intenses, quand il souffle contre les arbres, les édifices, les obstacles solides quelconques. Quant au bruit du vent qui s'engouffre dans les cheminées, il est dû à un mode d'ébranlement de l'air que nous étudierons, quand il s'agira des sons produits par le mouvement des gaz dans les tuyaux. Tel est le son dans les instruments de musique connus sous le nom d'*instruments à vent;* tels sont encore la voix humaine, les cris des animaux.

Les détonations des gaz, le bruit qui accompagne l'étincelle électrique, les explosions de la foudre sont des sons dus à de brusques changements de volume, à des dilatations et à des contractions successives des masses gazeuses.

Parmi les modes les plus curieux de production du son, il faut citer celui qui résulte du contact de deux corps solides à des températures différentes. C'est en 1805 que ce singulier

phénomène a été signalé pour la première fois par Schwartz, inspecteur d'une fonderie saxonne. Ayant posé sur une enclume froide un lingot d'argent à une température élevée, il fut étonné d'entendre des sons musicaux, pendant toute la durée du refroidissement de la masse. En 1829, Arthur Trevelyan plaça accidentellement un fer à souder très-chaud sur un bloc de plomb; presque aussitôt un son aigu s'échappa du fer. Il fut conduit de la sorte à étudier le phénomène sous toutes les formes et à imaginer des instruments propres à mettre en évidence cette cause de production du son : nous les décrirons bientôt en étudiant les vibrations sonores. (V. p. 161 et fig. 107.)

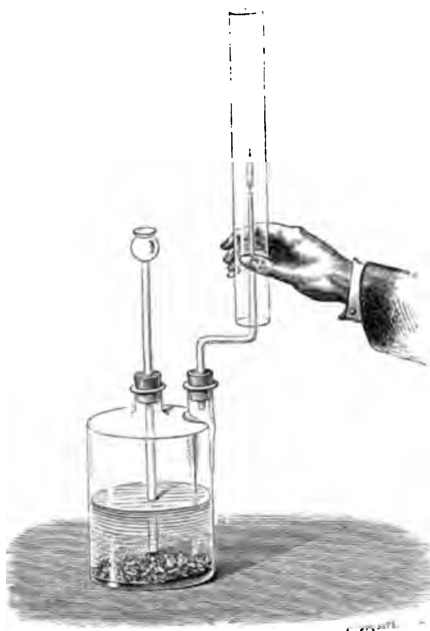


Fig. 93. — Harmonica chimique.

Le passage d'un courant électrique fait résonner une barre de fer suspendue en son milieu, et dont une extrémité est au centre d'une bobine d'induction.

Enfin la combustion des gaz dans les tubes donne aussi lieu à la production de sons musicaux. Si l'on allume le jet d'hydrogène qui se dégage du petit appareil nommé par les chimistes *lampe philosophique*, et qu'on introduise la flamme à l'intérieur d'un tube de plus grand diamètre, ouvert aux deux bouts, on entend un son aigu ou grave selon la longueur, le diamètre, l'épaisseur et la nature de la substance du tube. En disposant convenablement un certain nombre de ces appareils, on obtient une série de sons musicaux formant différents accords; de là, le nom d'*harmonica chimique*, sous lequel on connaît cette sorte d'instrument de musique. Ce fait a été le

point de départ des expériences curieuses de Schaffgotsch et de Tyndall sur les flammes chantantes.

Dans tout ce qui précède, nous n'avons eu en vue que la production du son ou du bruit dans les corps *sonores* qui peuvent être tantôt solides, tantôt liquides ou gazeux. Mais comment le son, celui d'un timbre par exemple qu'on vient de frapper, arrive-t-il jusqu'à notre oreille ? Des observations et des expériences très-simples vont nous permettre de répondre à cette question, avant même de savoir en quoi consiste le phénomène du son lui-même.

§ III. PROPAGATION DU SON DANS LES SOLIDES, LES LIQUIDES ET LES GAZ.

C'est d'abord un fait connu de tout le monde que le son met un temps appréciable à se propager du corps sonore à l'organe de l'ouïe. Quand nous observons à distance une personne qui frappe un coup de marteau par exemple, notre œil voit le marteau tomber avant que l'oreille entende le bruit de la percussion. De même, la détonation d'un fusil, d'un canon, parvient à l'oreille après que la flamme produite par l'explosion a brillé devant nous.

Je me rappelle avoir admiré sur les côtes de la Méditerranée le spectacle curieux d'un navire de guerre qui s'exerçait au tir du canon : je voyais la fumée des bordées d'artillerie, puis, sur les crêtes des vagues, les ricochets des boulets allant se perdre dans la mer, bien avant d'entendre le tonnerre de la détonation.

Dans tous ces cas, l'intervalle compris entre la vue du phénomène et l'audition du son marque la différence entre la vitesse de la lumière et celle du son lui-même; mais comme la vitesse de la lumière comparée à celle du son peut être considérée comme infinie, le même intervalle donne sans erreur sensible le temps que le son met à se propager d'un point à un

autre. Il est aussi bien établi par l'observation journalière que l'intervalle dont il vient d'être question augmente avec la distance.

Ainsi le son se propage successivement, nous verrons bientôt avec quelle vitesse. Mais quel est le milieu qui sert de véhicule à ce mouvement? Est-ce le sol? Se communique-t-il par l'intermédiaire des corps solides, des liquides, ou de l'air, ou encore par tous ces milieux à la fois? Voici une expérience qui répondra à ces questions.

Plaçons sous le récipient de la machine pneumatique un mouvement d'horlogerie muni d'un timbre sonore, dont le marteau est maintenu immobile par un encliquetage, mais qu'une tige permet de rendre libre à volonté (fig. 94). Avant de faire le vide, on entend très-bien le timbre résonner sous les coups du marteau. Mais à mesure que l'air se raréfie, le son diminue d'intensité; il disparaît complétement, dès que le vide est fait, si d'ailleurs on a eu la précaution de placer l'appareil sur un coussin formé de liége, d'ouate, ou en général d'une substance molle et peu ou point élastique. On voit alors le marteau frapper sur le timbre, mais on ne perçoit plus aucun bruit, aucun son. Si alors, à la place de l'air que contenait la cloche, on introduit un gaz quelconque, hydrogène, acide carbonique, oxygène, vapeur d'éther, etc., le son s'entend de nouveau.



Fig. 94. — Le son ne se propage pas dans le vide.

Ainsi l'air et en général tous les gaz sont des véhicules du son. Mais ils ne possèdent pas tous cette propriété au même degré. Ainsi, d'après les expériences de Tyndall, la conductibilité du gaz hydrogène pour le son est beaucoup moindre que celle de l'air, à égalité de pression, et cependant la vitesse

de propagation est près de quatre fois dans l'hydrogène ce qu'elle est dans l'air.

Les solides eux-mêmes transmettent le son, mais dans une mesure très-variée et qui dépend de leur élasticité. Ainsi dans l'expérience précédente, alors même que le vide est fait, si l'on approche l'oreille, on entend un son très-faible, transmis à l'air environnant par le coussin et par le plateau de la machine. Ce qui démontre mieux encore le fait de cette transmission par les solides, c'est que le son du timbre n'est qu'affaibli, si l'on pose directement l'appareil sur la platine de verre qui supporte la cloche.

L'eau, et en général tous les liquides sont aussi des véhicules du son, et au point de vue de l'intensité comme de la vitesse, de meilleurs véhicules que l'air. Un plongeur entend sous l'eau les moindres bruits, par exemple ceux que font les cailloux en roulant et se choquant les uns les autres.

Il ne faut pas confondre les sons que nous percevons par l'intermédiaire de l'air avec ceux que nous transmettent les solides, le sol par exemple ou tout autre corps élastique. Si l'on applique l'oreille à l'extrémité d'une pièce de bois un peu longue, on distingue fort bien le bruit que produit le frottement d'une épingle, d'un bout de plume à l'extrémité opposée : cependant une personne placée vers le milieu, mais l'oreille loin de la poutre, n'entend rien. Le tic-tac d'une montre suspendue à l'extrémité d'un long tube métallique, s'entend distinctement à l'autre bout, sans que les personnes plus rapprochées de la montre perçoivent aucun son. Hassenfratz, « étant descendu dans une des carrières situées au-dessous de Paris, chargea quelqu'un de frapper avec un marteau contre une masse de pierre qui forme le mur d'une des galeries souterraines. Pendant ce temps, il s'éloignait peu à peu du point où la percussion avait lieu, en appliquant une oreille contre la masse de pierre; bientôt, il distingua deux sons dont l'un était transmis par la pierre et l'autre par l'air. Le premier arrivait à l'oreille beaucoup plus rapidement, à

mesure que l'observateur s'éloignait, en sorte qu'il cessa d'être entendu à la distance de cent trente-quatre pas, tandis que le son auquel l'air servait de véhicule ne s'éteignit qu'à la distance de quatre cents pas. » (Haüy.)

Des expériences analogues exécutées à l'aide de longues barres de bois ou de fer donnèrent le même résultat, quant à la supériorité de vitesse, mais un effet inverse relativement à l'intensité.

Humboldt, décrivant les bruits sourds qui accompagnent presque toujours les tremblements de terre, cite un fait qui prouve la facilité avec laquelle les corps solides transmettent le son à de grandes distances. « A Caracas, dit-il, dans les plaines de Calabozo et sur les bords du Rio-Apure, l'un des affluents de l'Orénoque, c'est-à-dire sur une étendue de 130 000 kilomètres carrés, on entendit une effroyable détonation, sans éprouver des secousses, au moment où un torrent de laves sortait du volcan Saint-Vincent, situé dans les Antilles à une distance de 1200 kilomètres. C'est, par rapport à la distance, comme si une éruption du Vésuve se faisait entendre dans le nord de la France. Lors de la grande éruption du Cotopaxi, en 1744, on entendit des détonations souterraines à Honda, sur les bords du Magdalena : cependant, la distance de ces deux points est de 810 kilomètres, leur différence de niveau est de 5500 mètres, et ils sont séparés par les masses colossales des montagnes du Quito, de Pasto et de Popayan, par des vallées et des ravins sans nombre. Évidemment, le son ne fut pas transmis par l'air; il se prolongea dans la terre à une grande profondeur. Le jour du tremblement de terre de la Nouvelle-Grenade, en février 1835, les mêmes phénomènes se reproduisirent à Popayan, à Bogota, à Santa Marta et dans le Caracas, où le bruit dura sept heures entières, sans secousses, à Haïti, à la Jamaïque et sur les bords du Nicaragua. »

En résumé, la transmission du son du corps sonore à l'oreille peut se faire par l'intermédiaire des corps solides,

des liquides et des gaz; mais c'est l'atmosphère qui est le véhicule le plus ordinaire.

Il résulte de là que le son ne dépasse point les limites de l'atmosphère. Le bruit des explosions volcaniques par exemple ne peut se propager jusqu'à la Lune; et de même, les habitants de la Terre n'entendent pas les sons qui pourraient se produire dans les espaces célestes. Les détonations des aérolithes indiquent donc que ces corps, au moment où elles ont lieu, se trouvent déjà dans notre atmosphère, ce qui peut nous renseigner sur les limites de la couche gazeuse dont notre planète est enveloppée. Sur les hautes montagnes, la raréfaction de l'air est cause d'un grand affaiblissement dans l'intensité des sons. Selon de Saussure et tous les explorateurs qui lui ont succédé, un coup de pistolet tiré au sommet du Mont Blanc fait moins de bruit qu'un petit pétard; Ch. Martins, en décrivant un orage dont il a été témoin dans ces hautes régions, dit que « le tonnerre ne roulait pas; c'était un coup sec comme la détonation d'une arme à feu. » Gay-Lussac, dans sa célèbre ascension en ballon, remarqua que les sons de sa voix étaient considérablement affaiblis à la hauteur de 7000 mètres où il s'était élevé.

§ IV. VITESSE DU SON DANS L'AIR ET DANS LES AUTRES MILIEUX.

Voyons maintenant avec quelle vitesse le son se propage dans les différents milieux que nous venons d'énumérer. Parlons d'abord de la vitesse du son dans l'air.

Un grand nombre de savants des derniers siècles, parmi lesquels on remarque les noms de Newton, Boyle, Mersenne, Flamsteed, avaient cherché à déterminer cette vitesse, soit par la théorie, soit par l'expérience; les nombres auxquels ils parvinrent étaient les uns trop faibles, les autres trop forts. C'est à une commission de l'Académie des sciences qu'on doit les premières expériences précises, en 1738. Depuis, en 1822, di-

vers physiciens les reprirent par la même méthode. Voici comment ils procédèrent :

Ils se partagèrent en deux groupes qui se postèrent, les uns à Montlhéry, les autres à Villejuif, en deux stations choisies de telle sorte qu'aucun obstacle ne gênât la vue ; Gay-Lussac, Humboldt et Bouvard s'établirent à Montlhéry ; Prony, Arago et Mathieu, à Villejuif. Ils étaient les uns et les autres munis



Fig. 95. — Mesure de la vitesse du son dans l'air, entre Villejuif et Montlhéry, en 1822.

d'excellents chronomètres, et deux pièces de canon de même calibre, chargées de gargousses de même poids, avaient été disposées à chacune des stations.

Les expériences commencèrent à onze heures du soir, par un ciel serein et une atmosphère à peu près calme. Douze coups alternés de dix minutes en dix minutes furent tirés à chaque station, à partir d'un signal donné, et chaque groupe d'observateurs nota le nombre de secondes qui s'écoulait entre l'apparition de la lumière et la perception du son. Les divers nombres

ont donné pour moyenne 54 secondes 6 dixièmes, et comme la distance des deux pièces d'artillerie, mesurée avec soin, était de 18613 mètres 5 décimètres, ils en conclurent que le son parcourt 340 mètres 9 décimètres dans l'air, à la température de 16°. La réciprocité des mesures avait pour objet de compenser l'influence du vent[1].

Quant à la température de l'air, elle exerce une influence que la théorie et l'expérience ont également confirmée. Si la température augmente, le son se propage avec une rapidité plus grande; cette vitesse diminue, quand la température baisse.

Mais précisément parce que la vitesse de propagation du son varie avec la température, et aussi comme nous le disons plus loin, avec l'humidité ou l'état hygrométrique de l'air, les résultats obtenus sont probablement entachés d'inexactitude. Les couches d'air dans lesquelles le son se propage sont loin d'être homogènes, et l'on sait aujourd'hui que leur température pendant la nuit croît avec la hauteur. Pour éviter ces diverses causes d'erreur, M. Le Roux a mesuré directement la vitesse de propagation du son à travers une masse d'air contenue dans un tuyau cylindrique de 72 mètres de longueur. L'air était desséché, et sa température maintenue à 0° par de la glace fondante qui entourait le tube de tous côtés. L'ébranlement sonore était produit par un choc unique d'un marteau de bois, frappant une membrane de caoutchouc fortement tendue à l'une des extrémités du tuyau. Cet ébranlement, après avoir parcouru la longueur du tube, venait mettre en mouvement une seconde membrane tendue à l'autre extrémité. Enfin l'origine et la fin de la propagation se trouvaient enregistrées automatiquement par l'électricité, et sa durée mesurée par un chronoscope d'une nature particulière. De nombreuses expériences ont donné à M. Le Roux une vi-

1. Outre les expériences précédentes, il faut citer encore celles de Benzenberg en 1811, de Goldingham en 1821, de Moll et Van Beeck, de Stampfer et Myrbach en 1822, enfin de Bravais et Martins en 1844. En réduisant à zéro et à l'air sec les diverses vitesses trouvées, on obtient à peu de chose près pour moyenne 332 mètres par seconde, nombre trop fort.

tesse de 330^m,66 par seconde : c'est presque identiquement la vitesse qui résulte, pour la même température 0°, des expériences du Bureau des Longitudes en 1822.

M. Regnault vient de publier les conclusions d'une série de nombreuses expériences sur la propagation du son, soit dans des tuyaux cylindriques, soit à l'air libre. Il a trouvé que l'intensité et la vitesse du son diminuent simultanément dans les



Fig. 96. — Détermination expérimentale de la vitesse du son dans l'eau.

tuyaux, à mesure que le parcours est plus considérable, et cette diminution est d'autant plus forte que le diamètre du cylindre propagateur est plus faible : la nature des parois a aussi, paraît-il, une influence. Ces résultats, contraires aux formules théoriques et à ce qu'on avait pu jusqu'ici constater par l'expérience, sont dus à ce que les gaz n'ont pas en réalité, comme on le supposait dans le calcul, une élasticité parfaite. Mais le même savant a confirmé par ses expériences deux faits qu'indiquait la théorie, à savoir que, sous des pressions at-

mosphériques très-différentes, le son se propage avec la même vitesse, tandis que cette dernière varie selon la densité des milieux gazeux.

Dans l'air sec et tranquille, à 0°, il a obtenu 331m,37 pour la vitesse moyenne d'un son qui a parcouru 1280 mètres, et seulement 330m,7 pour celle d'un son qui, dans les mêmes conditions, a parcouru 2445 mètres. Cette différence vient, se-



Fig. 97. — Expériences faites sur le lac de Genève par Colladon et Sturm.

lon lui, de ce qu'au moment de l'explosion la vitesse est accrue par un transport des couches d'air les plus voisines de la bouche de l'arme à feu.

La vitesse du son est la même pour les sons aigus ou pour les sons graves, pour les sons faibles et pour ceux dont l'intensité est considérable. Tout le monde peut observer, en effet, que ni la mesure ni la justesse d'un morceau musical exécuté par un orchestre ne sont altérées, quelle que soit la distance de l'auditeur. Quand cette distance augmente, tous les

sons sont affaiblis dans un même rapport ; mais c'est la seule altération subie, ce qui n'arriverait pas si les sons de hauteur ou d'intensité diverses se propageaient avec des vitesses différentes. Enfin la vitesse du son dans l'air paraît être la même, dans une direction horizontale, verticale, ou oblique. Cela résulte d'observations faites en 1844 par Martins et Bravais, du sommet à la base du Faulhorn, et par Stampfer et Myrbach, dans deux stations inégalement élevées au-dessus du niveau de la mer.

De la différence qui existe entre les vitesses de la lumière, du son et des projectiles, résultent des conséquences singulières. Ainsi le soldat frappé par un boulet de canon peut voir le feu qui sort de la bouche de l'arme, mais il n'entend pas la détonation, parce que la vitesse du son est moindre que celle du boulet ; mais, s'il est frappé à une grande distance, la résistance de l'air diminuant de plus en plus la vitesse du projectile, il peut arriver qu'il voie la lumière, puis entende le coup avant d'être atteint.

Dans l'eau, le son se propage avec une rapidité environ quatre fois et un quart plus grande que dans l'air. Ce résultat est dû aux expériences que deux savants, Colladon et Sturm, ont faites en 1827 sur le lac de Genève. Voici comment ils procédèrent :

Les observateurs s'étaient postés sur deux barques, l'une amarrée à Thonon, l'autre sur la rive opposée du lac. Le son était produit par le choc d'un marteau sur une cloche plongée dans l'eau, et à l'autre station, un cornet acoustique à large pavillon recevait, aussi dans l'eau, sur une feuille métallique tendue à son ouverture, le son propagé par la masse liquide. L'observateur dont l'oreille était placée à l'ouverture du cornet, était muni d'un chronomètre ou compteur donnant avec précision les secondes et les fractions de seconde. Il était averti de l'instant précis de la percussion de la cloche, par la lumière que produisait l'inflammation d'un tas de poudre, inflammation déterminée par l'abaissement d'une mèche liée au marteau en forme de levier. Les figures 96 et 97 font comprendre

le mécanisme de cette disposition, et nous dispenseront d'une explication plus détaillée.

La distance des stations étant de 13 487 mètres fut parcourue par le son en 9 secondes 1/4, ce qui donne 1435 mètres pour la vitesse du son dans l'eau à la température de 8 degrés.

Enfin, on a déterminé aussi par l'expérience la vitesse du son dans les corps solides. M. Biot, ayant opéré sur une longueur de 951 mètres de tuyaux en fonte de fer, a trouvé que le son se propage dans ce métal avec une vitesse moyenne de 3250 mètres par seconde, plus de neuf fois et demie aussi grande que celle du son dans l'air à la même température.

Voici quelles sont les vitesses de propagation du son dans divers milieux gazeux, liquides et solides :

Vitesse du son dans les gaz, à 0°.	Hydrogène	1270^{m}
	Ammoniaque	407
	Air	331
	Oxygène.	317
	Acide carbonique	262
Vitesse du son dans les liquides.	Eau de Seine à 15° . . .	1437^{m}
	Eau de mer à 20°	1453
	Alcool absolu à 23° . . .	1160
	Éther sulfurique à 0° . .	1159
Vitesse du son dans les solides.	Bois de sapin	5994^{m}
	Verre	5438
	Acier, fer	5030
	Cuivre.	3716
	Chêne, noyer	3440
	Platine	2701
	Argent	2684
	Étain	2498

§ V. PHÉNOMÈNES DE RÉFLEXION ET DE RÉFRACTION SONORES.

Nous verrons bientôt que la lumière et la chaleur se propagent à la fois directement par rayonnement, et indirectement par réflexion. De plus, quand la propagation s'effectue dans des milieux dont la nature et la densité diffèrent, la direction des ondes lumineuses et calorifiques subit une déviation

particulière connue par les physiciens sous le nom de réfraction. Les mêmes phénomènes de réflexion et de réfraction existent pour le son, comme pour la chaleur et la lumière, et suivent à peu près les mêmes lois.

Que le son se réfléchisse, quand, se propageant dans l'air ou dans un autre milieu, il vient à rencontrer un obstacle, c'est ce dont tout le monde peut s'assurer par des observations familières. Les échos sont, en effet, des phénomènes dus à la réflexion du son. Quand on parle dans une chambre dont les dimensions sont suffisamment grandes, et dont les murs ne sont point garnis d'objets qui étouffent le son, la voix s'y trouve renforcée, et le bruit des pas ou celui qui résulte du choc de corps sonores retentit avec une très-grande intensité. Dans une salle encore plus grande, les paroles sont comme doublées, ce qui les rend souvent confuses et difficiles à percevoir nettement. Ce renforcement des sons, dû tant à la sonorité des murailles qu'à la réflexion des sons à leur surface, est ce qu'on nomme la *résonnance*.

Si la distance de l'observateur à la paroi réfléchissante dépasse 20 mètres, il perçoit nettement une seconde fois chacune des syllabes qu'il prononce : c'est le phénomène de l'*écho simple*. Enfin, quand chaque syllabe est répétée deux ou plusieurs fois, c'est un *écho multiple*. On va comprendre quelle est la raison de ces divers phénomènes.

Quelque brève que soit la durée d'un son, la sensation qu'il provoque dans l'oreille de l'auditeur persiste un certain temps, environ 1/10 de seconde. Pendant ce temps, le son parcourt à peu près 34 mètres, de sorte que si la distance AO de l'observateur au mur réfléchissant (*fig.* 98) est moindre de 17 mètres, le son de la syllabe qu'il a prononcée a le temps d'aller et de revenir à son oreille avant que la sensation soit entièrement épuisée. Le son réfléchi se mêlera donc à celui qu'il perçoit directement; et comme une multitude de réflexions partielles auront lieu des divers points de la salle, il en résultera un bourdonnement confus, ce que nous venons de nommer

une résonnance. La même explication s'appliquerait évidemment au cas de deux ou plusieurs personnes occupant la même salle et parlant soit isolément soit ensemble, et la confusion qui en résulterait serait d'autant plus grande que l'orateur parlerait avec plus de rapidité.

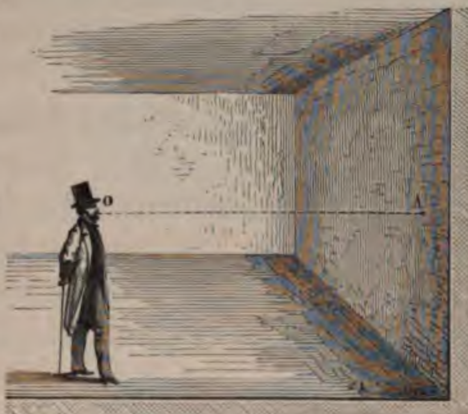


Fig. 98. — Réflexion du son. Phénomène de résonnance.

Si maintenant la distance OA surpasse 17 mètres, quand le son de la syllabe prononcée revient à l'oreille par réflexion, la sensation est terminée, et l'on entend une répétition plus ou moins affaiblie du son direct. Il y a écho. Plus la distance sera grande, plus le nombre des syllabes ou des sons distincts ainsi répétés sera considérable. Par exemple, supposons cette distance de 180 mètres, et que, dans une seconde, l'observateur prononce quatre syllabes, les mots *répondez-moi*. Pour aller à la surface réfléchissante et revenir, le son met un peu plus d'une seconde ; la sensation directe est passée et l'oreille entend une seconde fois et distinctement *répondez-moi*. Voilà pour l'écho simple.

L'écho multiple a lieu entre des surfaces réfléchissantes parallèles suffisamment éloignées. Dans ce cas, le son réfléchi par l'une d'elles va se réfléchir une seconde fois sur l'autre, et ainsi de suite ; mais il est clair que, par ces réflexions successives, les sons s'affaiblissent de plus en plus. Les édifices, les rochers, les masses d'arbres, les nuages mêmes produisent le phénomène de l'écho. On cite, parmi les plus curieux, l'écho du château de Simonetta, en Italie, qui répète jusqu'à quarante fois le mot prononcé entre les deux ailes parallèles de l'édifice. Nous trouvons dans le *Cours de Physique* de M. Boutet de Monvel, ce fait curieux que tous les visiteurs du

Panthéon peuvent vérifier. Dans un des caveaux du monument, « il suffit au gardien qui les fait visiter de donner un coup sec sur le pan de sa redingote pour faire éclater, sous ces voûtes retentissantes, un bruit presque égal à celui d'une pièce de canon. » C'est là un phénomène de résonnance et de concentration du son.

On cite dans les ouvrages anciens et modernes un grand nombre d'échos multiples, dont les effets plus ou moins surprenants eussent demandé à être vérifiés, mais qui tous s'expliquent sans difficulté par les réflexions successives du son. Tel est celui qui existait, dit-on, au tombeau de Métella, femme de Crassus, et qui répétait jusqu'à huit fois un vers entier de l'*Énéide*. Addison fait mention d'un écho qui répétait cinquante-six fois le bruit d'un coup de pistolet. Il était situé, comme celui de Simonetta, en Italie. L'écho de Verdun, formé par deux grosses tours distantes de 52 mètres, répétait douze ou treize fois le même mot. La grande pyramide d'Égypte contient à son intérieur des salles souterraines précédées de longs couloirs, dont l'écho répète le son jusqu'à dix fois. « Les vibrations, dit M. Jomard, répercutées coup sur coup, parcourent tous ces canaux à surfaces polies, frappent toutes ces parois, et arrivent lentement jusqu'à l'issue extérieure, affaiblies et semblables au retentissement du tonnerre quand il commence à s'éloigner. A l'intérieur, le bruit décroît régulièrement, et son extinction graduelle, au milieu du profond silence qui règne dans ces lieux, n'excite pas moins l'attention et l'intérêt de l'observateur. » Enfin Barthius parle d'un écho situé près de Coblentz sur les bords du Rhin, et qui répétait dix-sept fois la même syllabe : il avait cela de particulier qu'on entendait à peine la personne qui parlait, tandis que les répétitions produites par l'écho formaient des sons très-distincts.

Habitant, il y a quelques années, les bords de la mer sur le rivage d'Hyères, j'ai eu l'occasion d'entendre un des plus magnifiques échos dont j'aie jamais été témoin. Pendant toute une matinée, des détonations d'artillerie provenant d'un navire

mouillé dans la rade, se répercutaient sur les flancs des montagnes de la côte en échos prolongés qui me firent croire d'abord à la présence de toute une escadre : on eût dit entendre les grondements du tonnerre. Une seule décharge semblait durer ainsi près d'une minute.

La réflexion du son suit des lois très-simples, dont nous allons donner l'énoncé. Elles sont, comme nous le verrons plus tard, une conséquence naturelle du mouvement vibratoire qui constitue le son, mais elles se vérifient expérimentalement en dehors de toute hypothèse.

On nomme rayon sonore une ligne droite qui part du centre d'ébranlement ; au moment où il arrive en contact avec la surface réfléchissante, c'est le rayon *incident ;* et l'on appelle rayon *réfléchi,* la ligne suivant laquelle le son est renvoyé par cette surface dans le milieu d'où il émane. Les deux angles que les rayons incident et réfléchi font avec la perpendiculaire ou la normale à la surface au point d'incidence, sont les angles d'incidence et de réflexion. Ces définitions bien comprises, voici comment s'énoncent les deux lois de la réflexion du son :

Première loi. Le rayon sonore incident et le rayon réfléchi sont dans un même plan avec la normale à la surface au point d'incidence ;

Deuxième loi. L'angle d'incidence et l'angle de réflexion sont égaux entre eux.

La vérification expérimentale de ces deux lois est d'une grande simplicité. On met en regard, de façon que leurs axes coïncident, deux miroirs métalliques dont la forme est parabolique, c'est-à-dire est obtenue par la révolution autour de son axe de la courbe nommée *parabole* (fig. 99). Une telle courbe possède, près de son sommet A, un foyer F jouissant de cette propriété que toutes les lignes telles que FM, menées à des points différents de la parabole, se réfléchissent suivant les parallèles MZ à l'axe.... En un mot, les rayons partis du foyer et les parallèles à l'axe font des angles égaux

avec les normales à la parabole, aux points M.... Réciproquement, si des lignes parallèles à l'axe viennent à rencontrer la parabole, elles iront se réfléchir au foyer.

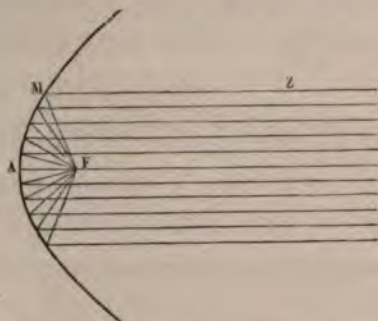
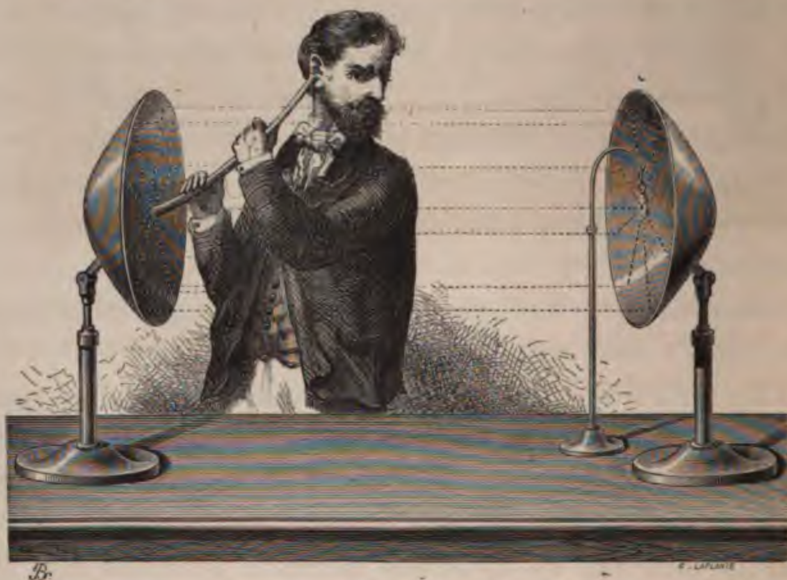


Fig. 99.—Propriété du foyer de la parabole.

Or, si l'on place une montre au foyer d'un des miroirs paraboliques, les ondes sonores provenant du tic-tac du mouvement seront renvoyées parallèlement à l'axe et iront se réfléchir, après avoir frappé la surface concave du second miroir, au foyer de celui-ci. L'observateur muni d'un tube, afin de ne point intercepter les ondes, entendra aisément le bruit de la montre, s'il place l'extrémité du tube au foyer du second miroir (fig. 100). Partout ailleurs le son n'est pas entendu, même par


Fig. 100. — Étude expérimentale des lois de la réflexion du son.

les personnes qui se placent dans l'intervalle des deux miroirs, à une faible distance de la montre.

La courbe nommée *ellipse* a deux foyers, et les rayons par-

tis de l'un vont se réfléchir à l'autre. Les salles dont la voûte est de forme elliptique doivent donc présenter le même phénomène que le système des deux miroirs paraboliques, et c'est en effet ce que l'expérience confirme. Le Musée des Antiques au Louvre possède une salle de ce genre, où deux personnes placées vers les deux extrémités opposées pourraient converser à voix basse, sans craindre l'indiscrétion des auditeurs qui se trouvent dans une position intermédiaire.

La réflexion du son est utilisée dans plusieurs instruments



Fig. 101. — Réflexion du son à la surface d'une voûte elliptique.

que nous aurons l'occasion de décrire en parlant des applications de la physique aux sciences et aux arts.

Le son se propage, nous l'avons vu, par l'intermédiaire de tous les milieux élastiques, mais avec des vitesses dans chacun d'eux qui dépendent dans une certaine mesure de leur densité. Quand le son passe d'un milieu dans un autre, sa vitesse changeant, il en résulte une déviation du rayon sonore, déviation qui rapproche ce rayon de la normale à la surface de séparation des deux milieux, si la vitesse est moindre dans le second que dans le premier. Comme la lumière éprouve une déviation semblable, qu'on a constatée par l'expérience bien avant d'en

trouver la véritable explication théorique, et que le phénomène est depuis longtemps connu sous le nom de *réfraction*, on a donné à la déviation des rayons sonores le nom de *réfraction du son*. Voici comment M. Sondhaus a mis hors de doute l'existence de cette déviation.

Ayant formé avec des membranes de collodion un sac en forme de lentille, il l'emplit de gaz acide carbonique. Dans ce gaz, la vitesse du son est moindre que dans l'air. Les rayons sonores qui viennent rencontrer la surface sphérique convexe

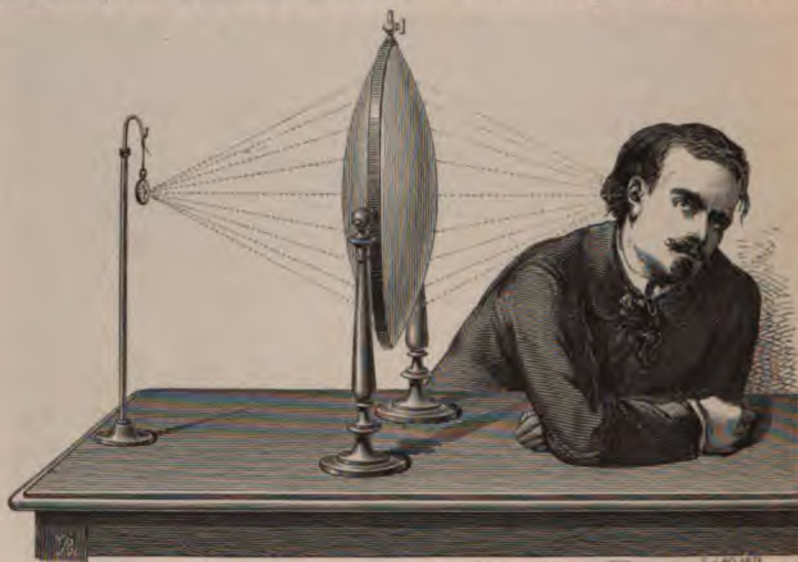


Fig. 102. — Réfraction sonore. Appareil de M. Sondhaus.

de la lentille, se réfractent en passant à travers le gaz et, sortant par la surface opposée, doivent aller converger en un point unique ou foyer. Et en effet, si l'on place une montre sur l'axe de cette lentille, on reconnaît qu'il y a, sur l'axe et de l'autre côté, un point où le tic-tac de la montre s'entend distinctement et mieux que partout ailleurs. Il y a donc évidemment convergence des ondes sonores vers le point de l'axe de la lentille dont il s'agit, et dès lors réfraction du son.

CHAPITRE II.

LES VIBRATIONS SONORES.

§ I. VIBRATIONS DES SOLIDES. DES LIQUIDES ET DES GAZ.

Le son est un mouvement vibratoire.

Les corps sonores sont des corps élastiques, dont les molécules, sous l'action de la percussion, du frottement ou des autres modes d'ébranlement, exécutent une série de mouvements de va-et-vient autour de leur position habituelle. Ces vibrations se communiquent de proche en proche aux milieux environnants, gazeux, liquides et solides, dans toutes les directions, et viennent atteindre l'organe de l'ouïe. Là, le mouvement vibratoire agit sur les nerfs spéciaux de cet organe et détermine dans le cerveau, si la vitesse et l'amplitude des vibrations ont des valeurs convenables, la sensation du son.

Des expériences très-simples permettent de mettre en évidence l'existence des vibrations sonores.

Si l'on prend une corde de violon, et qu'on la tende à ses deux extrémités au-dessus d'une surface de couleur sombre — dans les instruments à corde, cette condition se trouve réalisée ; — si l'on provoque alors un son à l'aide d'un coup d'archet transversal ou par le pincement de la corde en son milieu, on voit cette dernière s'élargir des extrémités au milieu, et présenter à l'œil, en ce dernier point, un renflement apparent, dû au mouvement rapide de va-et-vient qu'elle exécute. La corde est vue à la fois, pour ainsi dire, dans ses positions extrêmes et

moyennes, grâce à la persistance des impressions lumineuses sur la rétine.

Au lieu d'une corde, considérons une verge ou tige métallique flexible fixée à l'un de ses bouts. En la dérangeant de sa position d'équilibre, on la voit exécuter une série d'oscillations dont l'amplitude va en s'affaiblissant et finit par s'annuler. Pendant toute la durée des vibrations de la tige, on entend un son qui s'affaiblit et s'éteint avec le mouvement même.



Fig. 103. — Vibrations d'une corde tendue.

Une cloche de cristal, un timbre métallique, quand on en frotte le bord avec un archet, rendent des sons souvent très-énergiques. Or, on constate aisément l'existence des vibrations qui leur donnent naissance. Une tige métallique dont la pointe effleure, sans le toucher, le bord de la cloche, se met alors à choquer le cristal de coups secs et répétés, et le bruit qui en résulte se distingue aisément du son lui-même (fig. 105). La boule d'un pendule est renvoyée avec force et oscille pendant toute la durée du son. De même une bille métallique, posée à l'intérieur d'un timbre, sautille quand ce dernier résonne

(fig. 106) et accuse ainsi l'existence des vibrations dont les molécules du corps sonore sont animées.

L'instrument de Trevelyan dont nous avons parlé plus haut et à l'aide duquel on obtient des sons par le contact de deux corps solides à des températures inégales, permet aussi de rendre sensible à la vue l'existence des vibrations sonores (fig. 107). En plaçant en travers, sur le berceau métallique,



Fig. 104. — Vibrations d'une verge métallique.

une barre terminée par deux boules, le poids de cette barre rend les vibrations plus lentes, et on les suit des yeux dans le balancement alternatif qu'exécutent la baguette et les boules. Tyndall a imaginé un moyen fort ingénieux de mettre ces vibrations en évidence. Pour cela, il fixe au centre du berceau un petit disque d'argent poli, sur lequel il projette un faisceau de lumière électrique. La lumière réfléchie sur ce petit miroir va tomber sur un écran, et aussitôt que le fer chaud se trouve

en contact avec la masse froide du plomb, on voit le reflet de lumière se balancer sur l'écran.

Nous verrons, en étudiant les effets de la chaleur, que la cause des oscillations du berceau, dans l'instrument de Trevelyan, est dans la dilatation alternative du plomb aux points de contact du fer chaud ; cette dilatation brusque donne lieu à la formation de bourrelets (fig. 108) qui font basculer le



Fig. 105. — Constatation des vibrations d'une cloche de cristal.

berceau. Il en résulte une série de petits chocs assez multipliés pour produire, par la propagation des vibrations dans l'air, un son qui parvient ainsi jusqu'à notre oreille.

Nous verrons plus loin d'autres preuves de l'existence de ces mouvements moléculaires, quand nous décrirons les procédés employés pour mesurer le nombre des vibrations. Ajoutons seulement ici que le plus souvent, quand un corps solide produit un son, le mouvement vibratoire est rendu sensible par le frémissement que la main éprouve au toucher.

Les vibrations que la production ou la transmission du son détermine dans les masses liquides et dans les gaz, peuvent



Fig. 106. — Vibrations d'un timbre.

être également rendues visibles. Un verre à moitié rempli d'eau, vibre comme la cloche dont il vient d'être question.

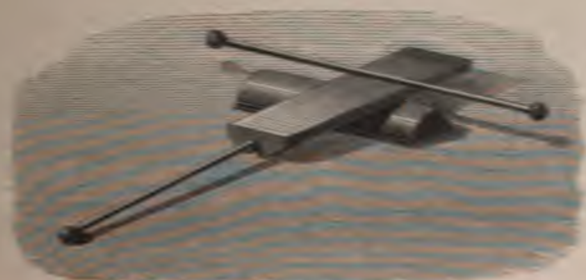


Fig. 107. — Instrument de Trevelyan.

lorsqu'on en frotte les bords, soit avec le doigt mouillé, soit avec un archet. Mais on voit alors, sur la surface du liquide, une multitude de stries, qui se partagent en quatre,

quelquefois en six groupes principaux, et ces stries sont d'autant plus serrées que le son est plus aigu. Si l'on force l'intensité du son, l'amplitude des vibrations devient si vive que l'eau jaillit de chaque groupe en pluie fine.

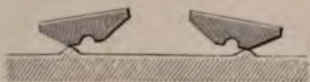


Fig. 108. — Instrument de Trevelyan; cause du mouvement vibratoire.

Enfin, si l'on adapte à une soufflerie un tuyau sonore, on peut constater les vibrations de la colonne d'air intérieure de la façon suivante : on suspend à l'aide d'un fil un cadre recouvert d'une membrane tendue à l'intérieur du tuyau. Quand le tuyau résonne, on aperçoit les grains de sable dont la membrane était préalablement recouverte sautiller à la surface, et prouver ainsi l'existence des vibrations de la colonne gazeuse, transmises à la membrane elle-même et aux grains



Fig. 109. — Vibrations d'une masse liquide.

légers dont elle est saupoudrée (fig. 110). Les vibrations transmises par l'air ont quelquefois une grande énergie. Les vitres frémissent, et même se brisent dans le voisinage d'une détonation un peu forte, comme celle d'une pièce de canon.



Fig. 110. — Vibrations d'une colonne gazeuse.

Voilà donc un fait fondamental parfaitement démontré par l'expérience. Le son résulte des mouvements vibratoires qu'exécutent les molécules des corps élastiques, solides, liquides ou gazeux, vibrations qui se transmettent à l'organe de l'ouïe par l'intermédiaire des divers milieux qui séparent ce dernier du corps sonore. On comprend donc comment il se fait que le son ne se propage pas dans le vide. Le timbre frappé sous le récipient de la machine pneumatique vibre quand même; mais ses vibrations ne se transmettent plus ou du moins ne se transmettent qu'imparfaitement par le coussin qui supporte l'appareil et par la faible quantité d'air qui reste toujours dans le vide le plus complet qu'on puisse réaliser.

§ II. HAUTEUR DES SONS.

Les sons se distinguent les uns des autres par plusieurs caractères, que nous allons définir.

Le plus important de ces caractères, tant au point de vue physique qu'au point de vue musical, est la *hauteur*, c'est-à-dire le degré d'acuité ou de gravité du son. Tout le monde distingue les sons aigus des sons graves, quel que soit d'ailleurs le corps sonore qui les produise. Deux sons de même hauteur sont dits à l'*unisson*.

L'*intensité* d'un son est un caractère tout différent de la hauteur ; le même son peut être fort ou faible, sans cesser d'avoir le même degré d'acuité ou de gravité.

Enfin les différents sons se distinguent encore les uns des autres par le *timbre*. Qu'une flûte et un violon par exemple émettent le même son musical, avec une égale force, l'oreille n'en saisira pas moins entre les deux sons émis une différence telle qu'il lui sera impossible de les confondre. C'est cette qualité particulière que les physiciens nomment le timbre :



Fig. 111. — Roue dentée de Savart. Le nombre des vibrations d'un son croît avec sa hauteur.

c'est elle qui nous permet de reconnaître, sans la voir, une personne dont le son de voix nous est familier.

La hauteur d'un son dépend uniquement du nombre plus ou moins grand de vibrations qu'exécutent à la fois le corps sonore et les milieux à l'aide desquels le son se propage. Plus le son est aigu, plus ce nombre est considérable : on va voir par quelles expériences les physiciens sont arrivés à constater cette importante loi, et comment ils ont procédé pour compter ces mouvements, que l'œil ou nos autres sens ne parviennent à saisir que d'une manière confuse.

La *roue dentée*, imaginée par Savart, permet de compter le nombre de vibrations qui correspond à un son donné. Le son est produit dans cet appareil par le choc d'une carte contre les dents d'une roue qu'on fait mouvoir à l'aide d'une manivelle. Lorsque la vitesse de la roue est très-faible, on n'entend qu'une série de bruits isolés, dont l'ensemble ne produit pas, à proprement parler, un son, et dont la hauteur est par conséquent inappréciable. Mais à mesure que la vitesse s'accroît, les vibrations multipliées de la carte transmises à l'air

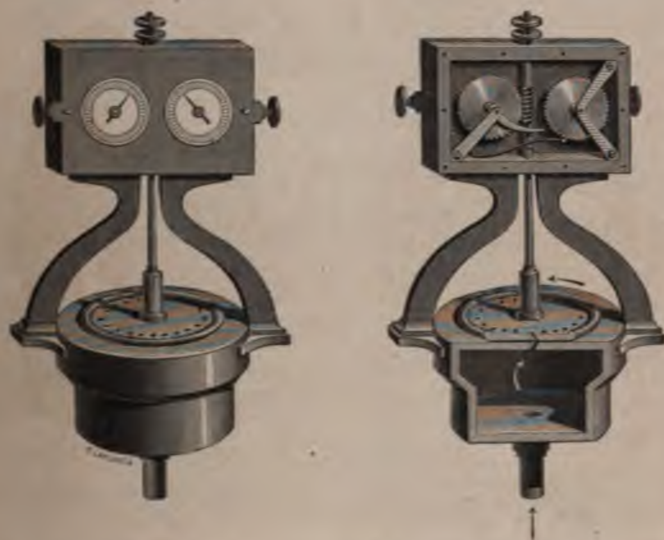


Fig. 112. — Sirène de Cagniard-Latour. Fig. 113. — Vue intérieure et coupe de la sirène.

produisent un son continu, dont l'acuité est d'autant plus grande que la vitesse est elle-même plus considérable. Un compteur, adapté à la roue dentée, permet de connaître le nombre des tours que fait la roue dans une seconde : ce nombre multiplié par celui des dents donne la moitié du nombre total des vibrations, car il est évident que la carte, d'abord infléchie, revient ensuite sur elle-même et donne deux vibrations simples à chaque dent qui passe.

Savart obtenait d'une roue munie de 600 dents, jusqu'à quarante tours par seconde, et par conséquent 48000 vibra-

tions dans ce même temps, ce qui correspond, comme on le verra plus loin, à un son d'une acuité ou d'une élévation extrême.

La *sirène*, dont l'invention est due à Cagniard-Latour, permet aussi de mesurer, et même avec une précision plus grande que la roue dentée de Savart, les vibrations d'un son donné. Dans cet appareil (fig. 112 et 113), le son est déterminé par le courant d'air d'une soufflerie qui passe par une série de trous



Fig. 114. — Sirène de Seebeck.

distribués à égale distance sur les circonférences de deux plateaux métalliques, dont l'un est fixe et l'autre mobile. Lorsque les trous se correspondent, le courant d'air passe, et sa force d'impulsion, agissant sur les canaux obliques qui forment les trous, détermine le mouvement du plateau supérieur. Par ce mouvement même, la coïncidence cesse, puis se rétablit, cesse de nouveau, ce qui détermine une série de vibrations de plus en plus rapides dans le milieu où est plongé l'instrument. S'il y a 20 trous, c'est 40 vibrations pour chaque tour du plateau ;

de sorte qu'en comptant le nombre des tours qui s'effectuent, pour un son donné, en une seconde, on peut calculer facilement le nombre total des vibrations. L'axe du plateau mobile s'engrène, à l'aide d'une vis sans fin, à une roue dentée, dont le nombre des dents est égal à celui des divisions d'un cadran extérieur. Quand la roue avance d'une dent, l'aiguille marche d'une division, de sorte que le nombre des divisions parcourues par l'aiguille donne celui des tours, et dès lors, par une



Fig. 116. — Étude graphique des vibrations sonores. Vibroscope.

simple multiplication, celui des vibrations sonores. A la fin de chaque tour, une came fait tourner une seconde roue d'une division, de sorte que si la première roue a 100 dents, l'aiguille du second cadran indique les centaines de tours.

Le compteur est disposé de telle sorte qu'il ne marche qu'à volonté, c'est-à-dire lorsque la vitesse atteinte a fini par donner le son dont l'évaluation est cherchée. La difficulté est de conserver la constance de vitesse, afin d'avoir un son d'une hauteur invariable pendant un temps aussi long que possible.

La sirène fonctionne aussi dans l'eau, et c'est alors le liquide,

sortant par les trous sous la pression d'une colonne d'eau très-élevée, qui détermine les vibrations. Le son qui en résulte prouve que les liquides entrent directement en vibration comme les gaz, sans que le son leur soit communiqué par les vibrations d'un solide. Le nom de sirène vient précisément de

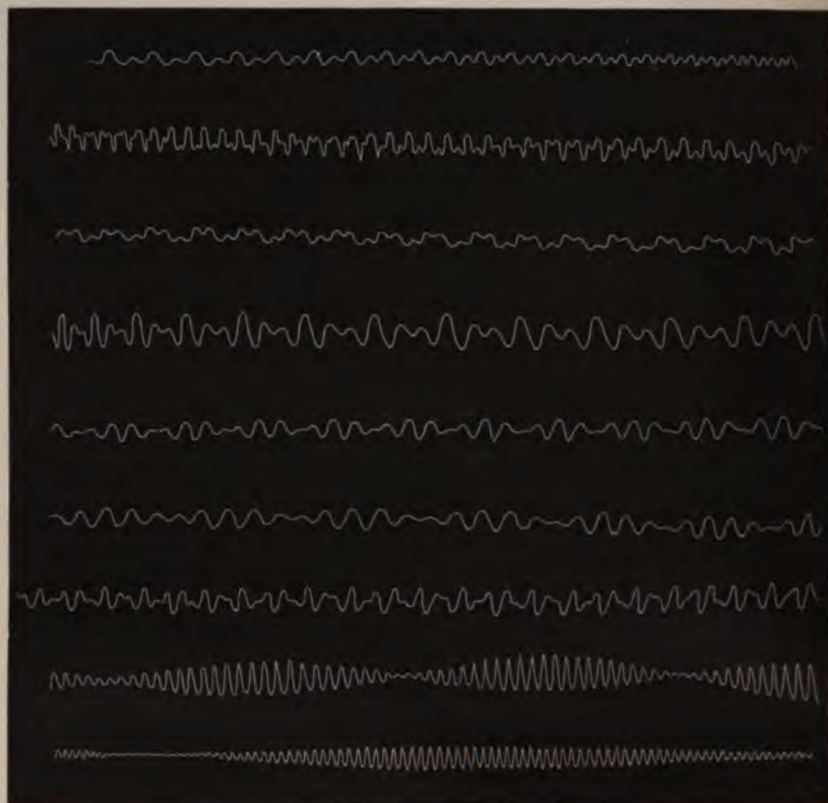


Fig. 116. — Épreuves de la combinaison de deux mouvements vibratoires parallèles.

cette circonstance, que l'instrument chante dans l'eau, comme les enchanteresses de la fable.

La sirène de Seebeck, que représente la figure 114, est construite d'une façon toute différente ; mais le principe est toujours le même, c'est-à-dire que le son est produit par le passage de l'air au travers des trous d'un disque. Le disque est mis en mouvement par un mécanisme d'horlogerie, et la vitesse de sa rotation s'évalue aussi à l'aide d'un compteur.

Tout autour règne un *sommier* communiquant avec une soufflerie : c'est le distributeur du courant gazeux que des *porte-vent* en caoutchouc transmettent à celle des séries de trous du disque que désire employer l'expérimentateur.

En variant le nombre et la distribution des trous sur des disques différents, on peut faire avec cette sirène un grand nombre d'expériences.

Enfin une méthode graphique dont l'idée première est due à Savart, permet encore d'estimer avec exactitude le nombre des vibrations sonores. On nomme *vibroscopes* les appareils

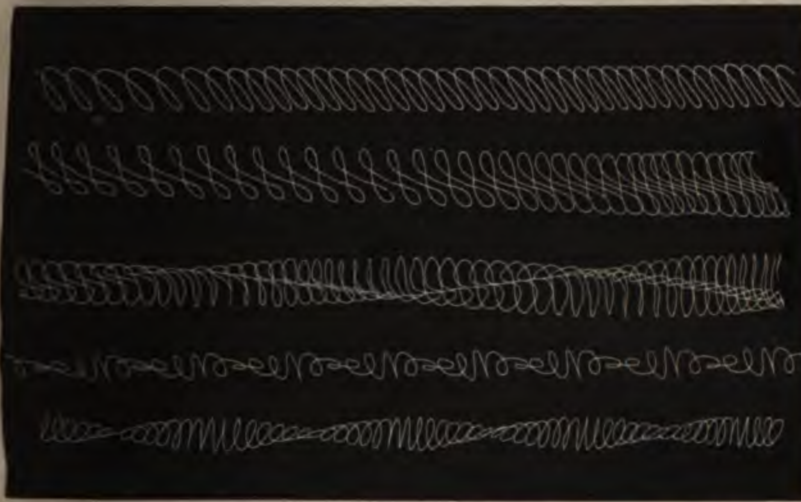


Fig. 116. — Épreuves de la combinaison de deux mouvements vibratoires rectangulaires.

qui enregistrent ainsi les vibrations : une pointe très-fine, adaptée à l'extrémité d'un diapason, ou d'une verge métallique, trace des lignes ondulées sur la surface de cylindres tournants, recouverts de noir de fumée. Le nombre des sinuosités donne évidemment celui des vibrations. Cette méthode est surtout employée, lorsqu'il s'agit de comparer deux sons entre eux, sous le rapport de leur hauteur. Par exemple, on peut fixer sur un diapason le style qui trace les lignes sinueuses, et sur un second diapason la lame recouverte de noir de fumée où ces lignes sont tracées. Faisant ensuite

vibrer simultanément les deux diapasons, la ligne sinueuse qu'on obtiendra sera évidemment le résultat de la combinaison de deux mouvements vibratoires, parallèles si les deux diapasons vibrent dans le même sens, rectangulaires s'ils sont placés à angle droit. Les figures 116 et 117 sont le fac-simile d'épreuves obtenues par ces deux combinaisons pour divers intervalles musicaux.

§ III. INTENSITÉ DES SONS.

Toutes les expériences que nous venons de décrire s'accordent à prouver que la hauteur d'un son dépend uniquement du nombre des vibrations exécutées par le corps sonore en un temps donné. L'intensité du son, fort ou faible, ne change rien au résultat; la nature du corps sonore et la qualité particulière qu'on nomme le timbre, n'ont pareillement aucune influence sur le nombre dont il s'agit.

C'est l'amplitude des vibrations qui donne au son plus ou moins d'intensité, comme on peut s'en assurer par mille expériences familières. Quand on frotte avec l'archet ou qu'on pince la corde d'un violon ou de tout autre instrument analogue, le son va en s'affaiblissant, à mesure que le mouvement de va-et-vient de la corde est moins prononcé. Plus le frottement de l'archet est vigoureux, plus les oscillations sont marquées, plus l'intensité du son est grande elle-même. Puisque d'ailleurs sa hauteur musicale n'est pas modifiée, il faut en conclure que les vibrations de la corde se font avec une rapidité plus grande, le chemin parcouru dans un temps égal étant plus considérable, lorsque l'amplitude est elle-même plus grande.

Du reste, lorsqu'un corps élastique produit un son, toutes les molécules dont il se compose ne sont pas également écartées de leurs positions d'équilibre ; il en est même, nous le verrons bientôt, qui restent en repos. Un timbre, par exemple, dont la

surface est frappée par un marteau, subit dans chacun des anneaux circulaires qui le composent, une déformation qui lui fait prendre des formes elliptiques opposées et alternatives. Les anneaux de la base tendent à exécuter des vibrations plus lentes et d'une plus grande amplitude que les anneaux voisins du sommet. Mais la solidarité des anneaux détermine une compensation entre ces amplitudes et ces vitesses différentes, et il en résulte, pour le son produit, une hauteur et une intensité moyennes qui dépendent des dimensions et de la nature du métal dont le timbre est formé. Il y a là une évidente analogie avec les oscillations du pendule composé, dont nous avons vu que la durée est une moyenne entre les durées des oscillations d'une série de pendules simples de différentes longueurs.

Il ne s'agit, dans ce que nous venons de dire, que de l'intensité intrinsèque du son, qui dépend seulement de l'amplitude des vibrations exécutées par ses molécules. Mais comme le son se transmet à notre oreille par l'intermédiaire de l'air, l'intensité sera d'autant plus grande que le volume d'air ébranlé à la fois sera plus considérable, et par conséquent que les dimensions du corps sonore seront elles-mêmes plus grandes. Une corde tendue sur un morceau de bois étroit donne un son moins fort, que si elle est tendue sur une table résonnante, comme dans les instruments de musique, le violon, le piano, etc. Tout le monde sait que si l'on fait vibrer un diapason. d'abord dans l'air, puis en appuyant le petit instrument sur une table ou sur tout autre corps élastique, le son primitif acquiert, par cette extension de volume du corps vibrant, une intensité beaucoup plus énergique.

L'intensité d'un même son, perçu par l'oreille à des distances différentes, décroît en raison inverse du carré de la distance. Ainsi à 10 mètres, l'intensité est quatre fois plus grande qu'à 20 mètres, neuf fois plus qu'à 30 mètres, etc., pourvu toutefois que les circonstances de la propagation restent les mêmes et que des corps réfléchissants voisins ne concourent pas à le

renforcer. Il résulte de là que si l'on produit, en deux stations différentes, deux sons dont l'un soit quadruple de l'autre en intensité, l'observateur qui se placera au tiers de la ligne qui les sépare, du côté du plus faible, croira entendre deux sons de même force. Voici quelle est la raison de cette loi. Les ondes sonores, se propageant sphériquement autour du centre d'ébranlement, mettent en mouvement des couches sphériques successives, dont le volume est en raison de la surface et croît dès lors comme les carrés de leurs distances au centre. Puisque les masses des couches ébranlées sont de plus en plus grandes, le mouvement qui leur est communiqué par la même force diminue dans la même proportion.

Dans les colonnes ou tuyaux cylindriques, les tranches successives sont égales : l'intensité des sons propagés doit rester à peu près la même, quelle que soit la distance[1]. C'est aussi ce que l'observation confirme. M. Biot, dans les expériences qu'il fit pour déterminer la vitesse du son dans les corps solides, constata ce fait que le son transmis par l'air dans les tuyaux des aqueducs de Paris, n'était pas sensiblement affaibli à une distance de près d'un kilomètre. Deux personnes se parlant à voix basse entretenaient aisément une conversation d'un bout à l'autre de ces tuyaux. « Pour ne pas s'entendre, dit M. Biot, il n'y aurait eu qu'un moyen, celui de ne pas parler du tout.»

Cette propriété des canaux cylindriques explique certains effets d'acoustique offerts par les salles ou les voûtes de divers monuments. Les arêtes des voûtes ou des murs forment des rigoles où le son se propage avec une grande facilité et sans perdre de son intensité première. On voit, à Paris, deux salles de ce genre : l'une de forme carrée et voûtée située au Conservatoire des Arts et Métiers, l'autre de forme hexagonale, à l'Observatoire de Paris; dans l'une et l'autre, les angles en se rejoignant par la voûte, déterminent des sortes de rigoles émi-

1. Les récentes expériences de M. Regnault ont montré toutefois que l'onde cylindrique diminue progressivement d'intensité : cette diminution est d'autant moindre que le diamètre du tuyau est plus grand.

nemment propres à conduire le son sans l'affaiblir. Aussi deux personnes peuvent causer à voix basse, d'un angle à l'autre, sans que les auditeurs placés entre eux saisissent rien de leur conversation. Dans l'église Saint-Paul de Londres, le dôme présente une disposition analogue : on cite encore la galerie de Glocester, l'église cathédrale de Girgenti en Sicile et la fameuse grotte de Syracuse, connue aujourd'hui sous le nom de *grotta della favella*, et dans l'antiquité sous celui d'*Oreille de Denys*. Dans les anciennes Latomies ou carrières de Syracuse, le tyran avait fait ménager, dit-on, une communication secrète entre son palais et les cavernes où il tenait enfermées ses victimes, mettant à profit la disposition particulière de la grotte pour épier leurs moindres paroles.

L'intensité du son perçu varie encore selon la densité du milieu qui le propage : c'est ce que nous avons vu déjà, dans l'expérience faite sous la cloche de la machine pneumatique : le son du timbre s'affaiblit, à mesure que le vide se fait. Le contraire aurait lieu, ainsi que l'a vérifié Hauksbée, si l'on comprimait l'air dans le récipient où est placé le corps sonore. Les personnes qui s'élèvent dans les hautes régions de l'air, soit sur les montagnes, soit dans les aérostats, constatent toutes un affaiblissement du son, produit par la diminution de densité de l'air atmosphérique. Dans l'eau, les ondes sonores se transmettent avec une plus grande intensité que dans l'air, si toutefois le corps sonore vibre avec la même énergie dans l'un et l'autre milieu. Dans les corps solides, de forme cylindrique ou prismatique, le son se propage sans s'affaiblir autant que dans l'air ou les gaz. Tout le monde connaît l'expérience qui consiste à placer l'oreille à l'extrémité d'une longue poutre de bois : on y entend très-distinctement les plus petits bruits, par exemple celui que produit le frottement d'une épingle. Les sauvages approchent l'oreille de terre pour entendre les sons lointains que l'air serait impuissant à transmettre à la même distance.

Un fait généralement connu, et qui est d'une observation

facile, c'est que le son s'entend plus loin pendant la nuit que dans la journée. On attribue cet accroissement d'intensité à l'homogénéité des couches d'air et à leur calme relatif, qui permettraient aux ondes sonores de se propager, sans perdre de leur amplitude par la réflexion. Il faut ajouter que pendant le jour, une multitude de bruits venant à la fois faire leur impression sur l'oreille, chacun d'eux doit se distinguer moins aisément.

D'après les observations de Bravais et de Martins, la distance à laquelle parvient un son dépend aussi de la température de l'air : cette distance est plus grande pendant les froids de l'hiver dans les régions glacées du pôle ou des hautes montagnes. C'est donc ici à l'homogénéité de l'air, plutôt qu'à sa densité, qu'on doit attribuer la cause de ce fait, puisque sur les montagnes la densité de l'air est moindre que dans la plaine. L'intensité du son transmis dépend certainement de l'état de repos ou d'agitation de l'air. C'est par un temps calme qu'il s'entend distinctement à la plus grande distance : le vent affaiblit le son, même quand il vient du point où résonne le corps sonore. La direction des vibrations, c'est-à-dire la façon dont l'auditeur est tourné relativement au point d'où part le son, a aussi sur son intensité une grande influence. Quand on écoute les fanfares d'un cor de chasse, si l'exécutant tourne le pavillon de son instrument dans diverses directions, l'intensité varie au point qu'il semble tantôt s'approcher, tantôt s'éloigner du lieu où se trouve l'auditeur : généralement un obstacle, surtout s'il s'agit d'un corps dont la masse transmet mal les vibrations, empêche le son de se propager, formant derrière lui comme une ombre sonore; l'intensité en est considérablement altérée.

Les circonstances susceptibles de modifier l'intensité d'un son sont donc très-variées. Il en résulte que la plus grande distance à laquelle il peut parvenir est difficile à déterminer. Dans les exemples remarquables que citent les physiciens, de sons entendus à des distances considérables, il est probable que

c'est le sol plutôt que l'air qui servait de véhicules aux vibrations sonores. Nous avons cité plus haut ce que dit Humboldt des détonations produites par les tremblements de terre ou les éruptions volcaniques, lesquelles se sont propagées jusqu'à des distances de 800 à 1200 kilomètres.

Chladni rapporte plusieurs faits qui prouvent que le bruit du canon se propage à des distances souvent très-grandes; au siége de Gènes, on l'entendit à une distance de 90 milles d'Italie; dans le siége de Manheim, en 1795, à l'autre extrémité de la Souabe, à Nordlingen et à Wallerstein; à la bataille d'Iéna, entre Wittenberg et Treuenbrietzen. « J'ai entendu moi-même, dit-il, les coups de canon à Wittenberg, à une distance de 17 milles d'Allemagne (126 kilomètres), moins par l'air que par les ébranlements des corps solides, en appuyant la tête contre un mur. »

Cependant, par l'air même, le son se propage souvent à une grande distance. Tels sont les roulements du tonnerre, et les détonations des bolides qui éclatent parfois à des hauteurs énormes. Chladni cite des météores dont l'explosion n'a été entendue que 10 minutes après la vue du globe lumineux, ce qui suppose une hauteur d'au moins 200 kilomètres. Le bolide observé dans le midi de la France le 14 mai 1864, a présenté la même particularité, et les observateurs ont noté jusqu'à 4 minutes entre l'apparition et la perception du bruit de la détonation. « Pour qu'une explosion, dit à ce sujet M. Daubrée, produite dans des couches d'air aussi raréfiées ait donné lieu à la surface de la terre à un bruit d'une pareille intensité, et sur une étendue horizontale si considérable, il faut admettre que sa violence dans les hautes régions dépasse tout ce que nous connaissons. » A moins, cependant, qu'il n'y ait là un effet de répercussion du son sur les couches d'inégale densité de l'air, analogue au roulement du tonnerre dans les orages.

On sait peu de chose encore sur ce qui produit la variété indéfinie des timbres. Nous dirons plus loin un mot des recherches récentes faites à ce sujet; les phénomènes que nous

avons encore à passer en revue sont nécessaires pour comprendre les explications proposées.

On a cherché à déterminer la limite des sons perceptibles; mais il est clair que cette limite dépend en partie de la sensibilité de nos organes. Le son le plus grave paraît être celui qui est produit par un corps sonore exécutant 32 vibrations simples par seconde. Savart avait trouvé, pour le plus aigu, 48 000 vibrations. Mais M. Despretz a fait exécuter une série de diapasons dont les sons étaient renforcés par des caisses d'harmonie, et il est arrivé à distinguer le son d'une acuité extrême que produit un diapason dont le nombre des vibrations est de 73 700 par seconde. Nous nous rappelons avoir assisté aux expériences du savant physicien : des sons aussi aigus produisent dans l'organe de l'ouïe une sensation presque douloureuse.

§ IV. PROPAGATION DU SON DANS L'AIR. — ONDES SONORES.

Quand un corps résonne, les vibrations qu'exécutent ses molécules ne parviennent à notre oreille de façon à nous donner la sensation du son, qu'en ébranlant de proche en proche la masse de l'air interposée entre le centre d'ébranlement et nos organes. En l'absence de ce véhicule, le son n'est plus perçu, ou du moins il n'arrive à nous que très-affaibli, après s'être propagé dans les corps solides plus ou moins élastiques, qui établissent une communication indirecte entre le corps sonore et l'oreille.

L'air entre donc en vibration lui-même, sous l'impulsion des mouvements qu'effectuent les molécules du corps sonore. Ses couches subissent des condensations et des dilatations successives qui se propagent avec une vitesse à peu près constante, quand la densité et la température restent les mêmes, c'est-à-dire quand l'homogénéité du mélange gazeux est parfaite.

Nous allons essayer de faire comprendre comment se suc-

cèdent les ondes sonores dans l'air ou dans tout autre gaz, et comment on a pu mesurer leur longueur.

Supposons que la lame d'un diapason soit placée en face d'un tuyau prismatique et mise en vibration. Les vibrations vont se propager dans la colonne d'air du tuyau. Voyons ce qui arrive dans les couches gazeuses, quand la lame exécute une vibration entière, c'est-à-dire part de sa position $a''b''$ pour aller en $a'b'$ et revenir ensuite en $a''b''$, en passant chaque fois par sa position moyenne ab (fig. 118). Ce mouvement de va-et-vient est analogue à celui du pendule, de sorte que la vitesse de la lame est alternativement croissante et décrois-

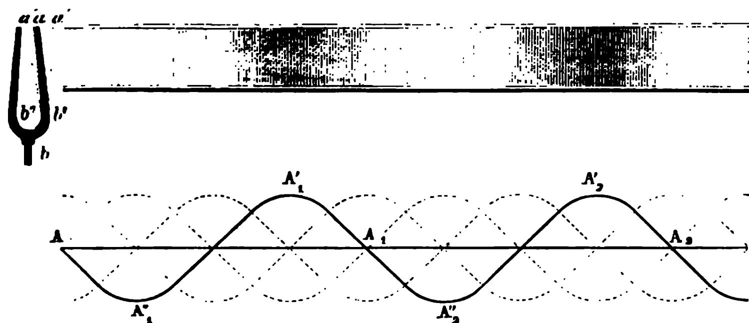


Fig. 118. — Propagation des vibrations sonores dans une colonne gazeuse cylindrique et indéfinie.

Fig. 119. — Courbe représentant une onde sonore.

sante suivant qu'elle s'approche ou qu'elle s'éloigne de la position ab. Pendant le mouvement de $a''b''$ en $a'b'$, les couches d'air du tuyau, recevant les impulsions de la lame, éprouveront des condensations successives et inégales qui se transmettront de l'une à l'autre, sans pour cela qu'il y ait transport des molécules. Ces condensations, d'abord croissantes, atteindront un maximum à partir duquel elles diminueront, jusqu'à ce que la lame vibrante ait atteint la position $a'b'$.

A son retour de $a'b'$ en $a''b''$, les mêmes tranches gazeuses revenues à leur densité normale se dilateront au contraire en vertu de leur élasticité, pour remplir le vide laissé en avant de la colonne d'air par la seconde excursion de la lame. Même

propagation des dilatations dans les couches gazeuses, dont chacune se trouvera ainsi osciller de chaque côté d'une position d'équilibre, transmettant à la couche suivante les mouvements successifs dont elle-même est animée.

A chaque vibration complète de la lame, correspondent donc une série de condensations : c'est la *demi-onde condensée ;* puis une série de dilatations : c'est la *demi-onde dilatée.* Leur ensemble forme une onde sonore complète, qui chemine dans toute l'étendue du tuyau.

Pour représenter à l'œil l'état de la colonne d'air dans toute l'étendue d'une onde sonore, on convient de figurer les divers degrés de condensation par des perpendiculaires situées au-dessus de la direction de l'onde, et, par des perpendiculaires tracées au-dessous de cette direction, les dilatations qui suivent (fig. 119) : ces deux lignes ont une longueur nulle, quand la densité est la densité normale ; leurs longueurs maxima correspondent aux condensations et aux dilatations maxima. La courbe $AA''_1A'_1A_1$ représente alors l'état des couches successives du tuyau au moment où la lame a exécuté une vibration entière ; AA_1 est le chemin parcouru pendant ce temps, c'est-à-dire la longueur de l'onde sonore.

L'espace parcouru par cette onde sera double, triple, etc.... après les deux, trois.... premières vibrations.

Il est facile maintenant de comprendre comment on a pu calculer la longueur d'onde d'un son de hauteur donnée. Supposons un son exécutant 450 vibrations par seconde. A la température de 15°, — si telle est, en ce moment, la température de l'air, — la vitesse de propagation étant de 340 mètres dans le même intervalle, il est clair qu'au moment où le son parvient à cette distance, il y a eu dans l'air autant d'ondes sonores successives que de vibrations complètes du centre d'émission, c'est-à-dire 450. Chacune d'elles a donc pour longueur la quatre cent cinquantième partie de l'espace parcouru, c'est-à-dire de 340 mètres : la longueur d'onde est dans ce cas, 0 mètre 755 millimètres.

Si l'on passe maintenant du cas où le son se propage dans une colonne prismatique, à celui où la propagation se fait dans tous les sens autour d'un point, les condensations et dilatations successives des couches d'air se distribueront à des distances égales du centre d'émanation. Les ondes seront sphériques, sans que leur vitesse de propagation ni leur longueur chan-



Fig. 120. — Propagation d'une onde sonore dans un milieu indéfini.

gent. Seulement l'amplitude diminuera et par suite l'intensité du son, comme nous l'avons déjà remarqué. La figure 120 donne une idée de la manière dont se distribuent les ondes sonores autour du centre d'émission. On y voit la série des demi-ondes condensées et dilatées, et les courbes ondulées partant du centre montrent que les condensations et les dilatations perdent de leur amplitude à mesure que croît la distance; la dégradation de la teinte a pour objet d'indiquer la même décroissance d'amplitude.

Pour se rendre compte du fait que les ondes se propagent sans qu'il y ait transport de molécules, on compare ordinairement les ondes sonores au mouvement d'une corde à laquelle on imprime une brusque secousse. Les ondulations parcourent la corde d'un bout à l'autre ; si elle est attachée par une de ses extrémités, l'onde revient sur elle-même. Dans l'un et l'autre cas, le mouvement se transmet, sans qu'il y ait changement réel dans la distance des molécules au point d'où part l'impulsion. De même, si l'on jette une pierre dans l'eau, l'ébranlement produit dans la masse liquide se propage suivant une série d'ondes concentriques qui s'affaiblissent à mesure que croît la distance, mais sans que les molécules d'eau soient réellement entraînées, comme il est facile de s'en assurer en observant la position fixe que conservent les petits corps flottant à la surface. Mais dans ces deux exemples, d'ailleurs bien propres à donner une idée de la propagation des ondes sonores, il y a une différence essentielle qu'il ne faut point oublier. Les condensations et dilatations de l'air dues aux vibrations des corps sonores s'effectuent dans le sens même du mouvement de propagation : elles se font parallèlement à la direction de chaque rayon sonore, tandis que les ondulations de la corde, ou celles de la surface de l'eau, s'effectuent dans un sens perpendiculaire au mouvement de propagation. Nous verrons bientôt que tel est précisément le cas des ondes qui cheminent dans le milieu qu'on nomme éther, et qui ont pour origine les vibrations des sources lumineuses.

Tout cela nous rend parfaitement compte de la transmission d'un son unique que l'air transporte pour ainsi dire jusqu'à notre oreille. Mais si l'air est ainsi le véhicule des vibrations sonores, comment se fait-il qu'il propage, sans les troubler, celles de plusieurs sons simultanés ? Nous assistons à un concert ; de nombreux instruments émettent à chaque instant des sons qui diffèrent par l'intensité, par la hauteur, par le timbre. Les centres d'émission sont diversement distribués dans la salle; comment la masse d'air que l'enceinte renferme, peut-elle à la

fois transmettre tant de vibrations, sans qu'il y ait complète cacophonie?

Ou bien encore, c'est le matin. La pluie tombe fine et drue, et les gouttelettes en frappant le sol, font une multitude de petits bruits qui arrivent distincts à l'oreille; les chants des oiseaux que la venue du printemps réveille partout, s'élèvent dans l'air et semblent percer la légère brume dont la pluie raye l'horizon. Par-dessus tout ce gazouillement et ce ramage, le chant du coq, les aboiements des chiens, les cahots d'une lourde voiture sur la route pavée, le son des cloches, par-ci par-là des voix humaines, tout cela chante, crie, parle, résonne à la fois, sans qu'il en résulte pour l'oreille aucune confusion. Ces sons multiples dont la simultanéité serait discordante, s'ils se produisaient tous dans un epace resserré, et que leurs résonnances vinssent les troubler encore, se noient dans la vaste étendue des couches d'air qui surplombent la plaine, se fondant ainsi dans une douce harmonie. Ici, la même question se présente encore. Comment l'air peut-il transmettre à la fois et distinctement tant d'ondulations émanées de centres différents, tant de vibrations qui ne sont point isochrones? Comment l'intensité, la hauteur et le timbre de chaque son peuvent-ils coexister, sans altération, dans ce milieu élastique et mobile?

Il y a là un problème dont les données paraissent si complexes, qu'elles échappent à l'analyse. Cependant la théorie rend compte de ces phénomènes dont l'explication paraît si difficile au premier abord, et des expériences simples justifient ses conclusions. Deux savants géomètres du dernier siècle, Daniel Bernouilli et Euler ont démontré le principe de la *coexistence des petits mouvements, des petites oscillations* dans un même milieu. Voilà pour la théorie.

Maintenant, jetez dans l'eau en des endroits voisins, deux ou plusieurs pierres, vous verrez les cercles concentriques produits par chacune d'elles s'entre-croiser sans se détruire, surtout si leur amplitude n'est pas trop grande. La figure 121, que nous empruntons à l'ouvrage d'un savant physicien, M. Weber,

montre à la fois comment les ondes se croisent à la surface d'un liquide, et comment elles se réfléchissent sur les parois du vase. La forme de ce dernier est elliptique ; il est plein de mercure, et les ondes qu'on aperçoit à sa surface sont celles qu'a produites la chute d'une goutelette du liquide à l'un des foyers de l'ellipse. Il en est résulté des ondes circulaires concentriques à ce foyer, puis des ondes réfléchies, qui toutes

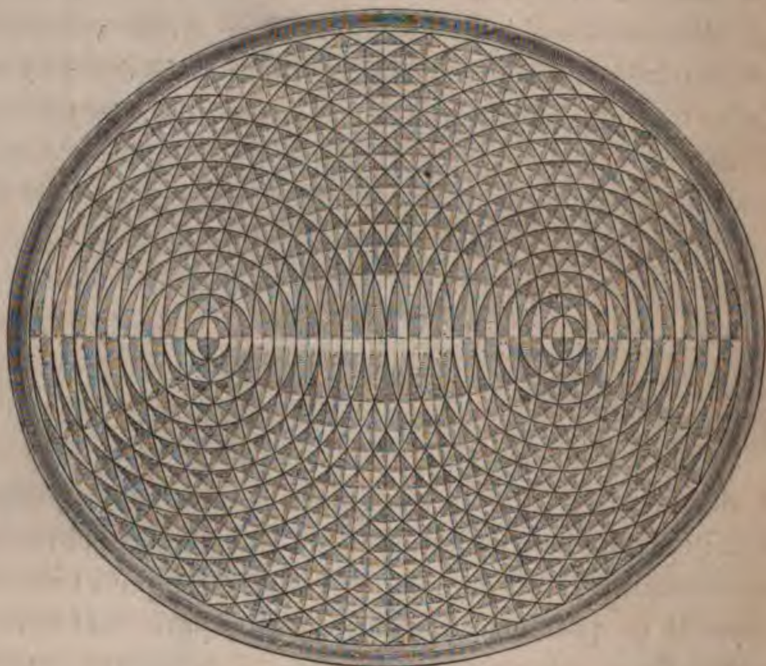


Fig. 121. — Expérience prouvant la coexistence des ondes. Propagation et réflexion des ondes liquides à la surface d'un bain de mercure.

viennent concourir au second foyer de la courbe. Les choses se passent évidemment de la même façon que si deux gouttelettes étaient tombées à la fois à chaque foyer.

Cette ingénieuse expérience démontre donc, d'une part, la coexistence des ondes simultanées et d'autre part la loi de leur réflexion. En faisant la restriction dont nous avons parlé plus haut sur la direction des ondes sonores, elle donne donc une idée fort juste de la réflexion des sons et de leur propagation simultanée dans l'air.

§ V. LOIS DES VIBRATIONS SONORES DANS LES CORDES.

La musique est aujourd'hui un art si répandu, que la plupart de nos lecteurs connaissent sans doute, pour l'avoir pratiqué ou tout au moins l'avoir vu fonctionner, le mécanisme des instruments à cordes, du violon, par exemple.

Quatre cordes d'inégale grosseur et de différentes natures sont tendues à l'aide de chevilles entre deux points fixes et rendent, quand on les pince ou qu'on les frotte transversalement avec un archet, des sons de diverses hauteurs. Les sons rendus par les cordes *à vide* (c'est-à-dire vibrant dans toute leur longueur) doivent avoir entre eux certains rapports de hauteur, dont nous parlerons bientôt. Quand ce rapport est détruit, l'instrument n'est pas accordé. Que fait alors le musicien? il tend plus ou moins, en serrant ou en desserrant les chevilles, celles des cordes qui ne rendent pas les sons voulus: s'il les tend davantage, le son devient plus aigu: plus grave au contraire, s'il les détend. Mais quatre sons seraient insuffisants pour rendre les notes variées d'un morceau de musique. L'exécutant en multiplie à volonté le nombre, en plaçant les doigts de la main gauche sur tel ou tel point de chacune des cordes. En agissant ainsi, il réduit à des longueurs variées les parties de ces cordes que l'archet met en vibration.

Ces faits, que tout le monde connaît, montrent qu'il existe certains rapports entre les hauteurs des différents sons donnés par l'instrument, et les longueurs, grosseurs, tensions et natures des cordes; comme ces hauteurs dépendent elles-mêmes du nombre des vibrations exécutées, il en résulte nécessairement que ce nombre est lié par certaines lois aux éléments énumérés plus haut. Les plus importantes de ces lois avaient été entrevues par les anciens philosophes et notamment par les Pythagoriciens. Mais c'est aux géomètres du siècle dernier, parmi lesquels nous citerons les noms illustres des Tay-

lor, Bernouilli, d'Alembert, Euler et Lagrange, qu'on en doit la démonstration complète, déduite de la pure théorie. L'expérience a confirmé l'exactitude du calcul.

Ce sont ces lois que nous allons maintenant chercher à faire comprendre. Aujourd'hui, on les vérifie aisément à l'aide d'un instrument particulier, le *sonomètre*, auquel on joint l'un ou l'autre des appareils qui servent à compter les nombres de vibrations des sons. Le sonomètre ou monocorde (fig. 122) est formé d'une caisse en sapin destinée à renforcer les sons ; au-dessus de cette caisse une ou plusieurs cordes sont fixées, à leurs extrémités par des pinces en fer, et tendues par des



Fig. 122. — Sonomètre.

poids qui servent à mesurer les tensions de chacune d'elles. Une règle divisée, fixée au-dessous des cordes, sert à évaluer les longueurs des parties vibrantes, longueurs qu'on fait varier à volonté à l'aide d'un chevalet mobile circulant le long de la règle et au-dessous des cordes.

Considérons une corde quelconque, corde de boyaux ou corde métallique. Tendons-la par un poids suffisant pour qu'elle rende un son parfaitement pur et dont la hauteur soit appréciable à l'oreille. Sa longueur totale mesurée à l'aide de la règle est, je suppose, de $1^m,20$, et le son qu'elle rend correspond, vérification faite avec la sirène, à 440 vibrations par seconde. Plaçons le chevalet mobile successivement à la moitié, au 1/3, au 1/4, au 1/12 de la longueur totale; et dans chacune de ces positions successives, faisons vibrer la portion la plus

courte de la corde. En évaluant les divers sons obtenus, nous trouverons par seconde les nombres suivants de vibrations : 880, 1320, 1760 et 5280.

Il suffit maintenant de mettre en regard les nombres qui mesurent les différentes longueurs de la corde et ceux qui indiquent les nombres de vibrations, pour apercevoir la loi :

Longueur de la corde..		120	60	40	30	10
	ou	1	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{12}$
Nombres de vibrations.		440	880	1320	1760	5250
	ou	1	2	3	4	12

N'est-il pas évident par cette expérience que les nombres de vibrations vont en croissant, de manière que leurs rapports sont précisément inverses de ceux que forment entre elles les longueurs des cordes.

Telle est la premiere loi des cordes vibrantes.

Maintenant, sans faire varier la longueur, si l'on tend la même corde par des poids différents, et que l'on compare les sons obtenus, on trouvera que, pour des nombres de vibrations doubles, triples, quadruples, etc., les tensions des cordes sont 4, 9, 16, etc., fois plus considérables. Les nombres de vibrations suivant l'ordre des nombres simples, les poids ou tensions suivent l'ordre des carrés de ces nombres.

Les cordes sont de forme cylindrique. Faisons varier le diamètre de ces cylindres, et comparons les sons produits par deux cordes de même nature, tendues par des poids égaux et d'égale longueur, mais de diamètres différents. Cette comparaison sera facile à l'aide du sonomètre. On trouve alors que les nombres de vibrations de ces sons décroissent quand les diamètres des cordes augmentent, et deviennent précisément 2, 3, 4.... fois moindres, quand les diamètres sont 2, 3, 4.... fois plus grands.

C'est la troisième loi des vibrations transversales des cordes vibrantes.

Il en est une quatrième, qu'on peut vérifier comme les au-

tres à l'aide du sonomètre, et qui est relative à la densité de la substance dont la corde vibrante est formée. Deux cordes, l'une de fer, l'autre de platine, de même longueur et de même diamètre, sont tendues sur l'appareil à l'aide de poids égaux. Les sons qu'elles vont rendre seront d'autant plus graves que la densité est plus grande, de sorte que la corde de fer donnera le son le plus aigu, la corde de platine le moins élevé; l'oreille suffira pour juger de ces différences.

Or, si l'on évalue les nombres exacts de vibrations qui correspondent aux deux sons obtenus, on trouvera:

Pour le fer.	1640
Pour le platine.	1000

Il ne s'agit point ici bien entendu des nombres mêmes, mais de leurs rapports. Or, si l'on multiplie chacun de ces nombres par lui-même, si l'on en fait le carré, l'on trouve 2 689 600 et 1 000 000, qui expriment précisément, en ordre inverse, les densités des métaux, le platine et le fer. La densité du fer est 7,8, celle du platine 21,04, et ces densités sont entre elles comme 1,00 est à 2,69. Telle est la loi: toutes choses égales, les carrés des nombres de vibrations sont en raison inverse des densités des matières, dont les cordes vibrantes sont formées.

Dans tout ce qui précède, il ne s'agit que des vibrations transversales des cordes, c'est-à-dire des sons qui résultent soit du pincement, soit du frottement à l'aide d'un archet. Une corde frottée dans le sens de sa longueur, par exemple avec un morceau d'étoffe enduit de colophane, rend aussi un son, mais ce son est beaucoup plus aigu, de sorte que le nombre des vibrations longitudinales surpasse toujours celui des vibrations transversales. Comme on n'emploie pas ce mode d'ébranlement des cordes, nous ne nous étendrons pas davantage sur ce sujet. Mais nous ne quitterons pas les cordes vibrantes, sans faire mention d'un phénomène d'un grand intérêt: nous voulons parler de la formation des *nœuds* et des *ventres* sonores,

et des sons particuliers que les musiciens et les physiciens nomment *sons harmoniques*.

Considérons une corde tendue sur le sonomètre, ou sur un instrument de musique quelconque. Fixons, en le touchant du doigt, son point milieu, et, avec l'archet, ébranlons l'une des moitiés : le son produit sera, comme on doit s'y attendre, plus aigu que le son fondamental, le nombre des vibrations ayant doublé. Musicalement parlant, c'est l'*octave* du son fondamental.

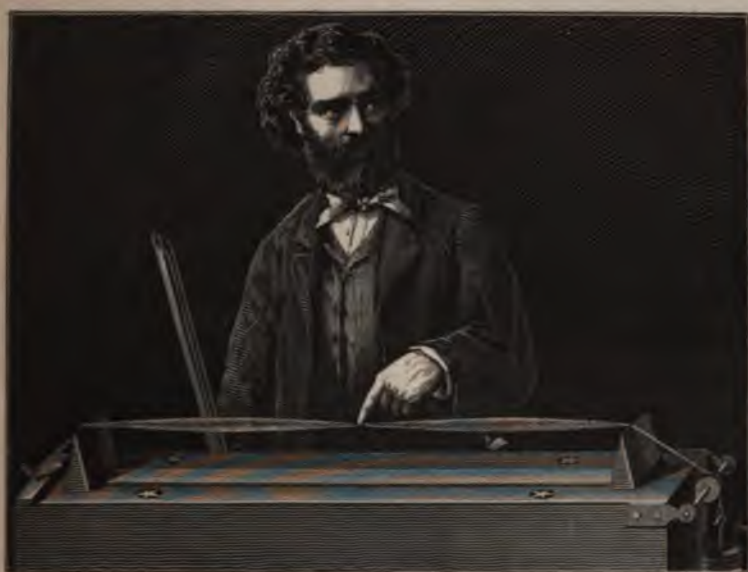


Fig. 123. — Sons harmoniques. Nœuds et ventres d'une corde vibrante.

Mais, chose remarquable, les deux moitiés de la corde vibrent ensemble, ce dont on peut s'assurer de deux façons : d'abord en mettant à cheval sur le milieu de la moitié restée libre de petits cavaliers de papier qui sautillent et tombent dès que le son se produit ; puis, en constatant à l'œil l'existence d'un renflement sur les deux moitiés de la corde (fig. 123). En retirant le doigt sans abandonner le mouvement de l'archet, on remarque même que le son persiste, ainsi que le partage de la corde en deux parties qui vibrent simultanément.

Faisons une seconde expérience, et plaçons maintenant le

doigt au tiers de la corde, en attaquant toujours avec l'archet la partie la moins longue (fig. 124). Le son est encore plus aigu; et l'on voit la corde totale se subdiviser en trois parties égales, vibrant séparément, ce que l'on constate en plaçant des cavaliers aux points de division, ainsi qu'au milieu de chaque tiers de la corde. Les premiers restent immobiles, les autres sont projetés, ce qui indique l'existence de points immobiles ou de *nœuds*, et de parties vibrantes dont le milieu est ce qu'on



Fig. 124. — Sons harmoniques. Nœuds et ventres d'une corde vibrante.

nomme un *ventre*. Sur un fond noir, les nœuds et les ventres sonores se distinguent fort bien. Les premiers montrent la corde blanche réduite à son épaisseur propre; les autres laissent voir des renflements semblables à ceux que nous avons signalés au milieu d'une corde vibrant dans sa totalité.

Une corde peut ainsi se partager en 2, 3, 4, 5.... parties égales, et les sons de plus en plus aigus qu'elle rend alors sont des *sons harmoniques*. Les oreilles exercées parviennent à distinguer quelques-uns des sons harmoniques qui se produisent simultanément avec le son fondamental d'une corde à vide ; ce qui

fait voir que le partage de la corde en parties vibrantes a lieu, alors même que la fixation d'un point n'en est pas la cause déterminante. Nous verrons plus tard quel est le degré qu'occupent ces différents sons dans l'échelle musicale. Étudiées à l'aide de la méthode graphique, les vibrations sonores qui engen-



Fig. 125. — Vibrations de sons composés.

drent les sons harmoniques montrent bien qu'il s'agit là de sons composés dont les vibrations simples se superposent (fig. 125). Les nœuds et les ventres sonores ne sont pas particuliers aux cordes vibrantes : nous allons les retrouver dans les colonnes d'air qui vibrent à l'intérieur des tuyaux ; nous les observerons encore dans les plaques et dans les membranes.

§ VI. LOIS DES VIBRATIONS DANS LES TUYAUX SONORES.

Les instruments de musique, dits *instruments à vent*, sont formés de tuyaux solides, tantôt prismatiques, tantôt cylindriques, les uns de forme rectiligne, les autres plus ou moins contournés. La colonne d'air que ces tuyaux renferment est mise en vibration par une embouchure, dont la forme et la disposition varient selon les instruments. Nous aurons l'occasion d'en décrire les principaux genres, quand nous traiterons des applications de la Physique aux arts. Mais pour connaître les lois générales qui régissent les vibrations des colonnes gazeuses contenues dans les tuyaux, nous nous bornerons ici à

considérer les tuyaux droits en forme de prismes ou de cylindres, tels qu'ils existent dans les orgues.

Les figures 126 et 127 représentent la vue extérieure et la coupe ou la vue intérieure de deux tuyaux de ce genre. On voit à la partie inférieure de chacun d'eux le conduit par où pénètre l'air donné par une soufflerie : le courant entre d'abord dans une boîte, puis il s'échappe par une fente qu'on nomme la lu-

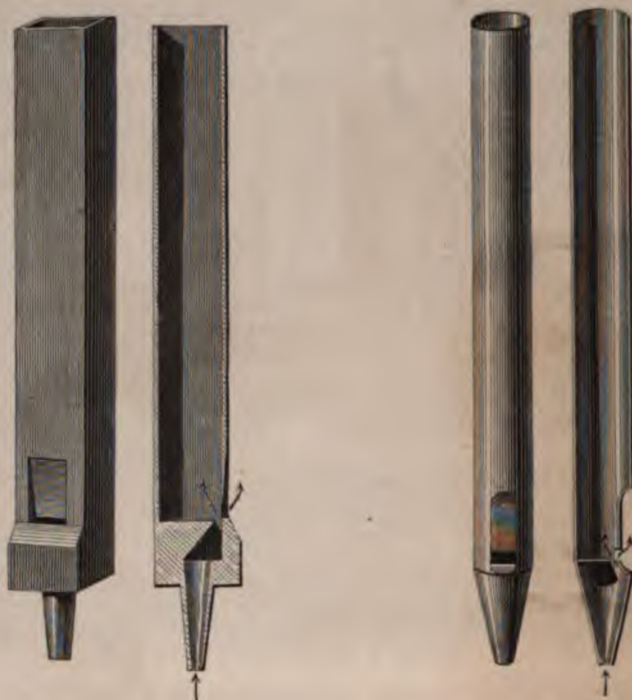


Fig. 126. — Tuyaux sonores prismatiques. Fig. 127. — Tuyaux sonores cylindriques.

mière et vient se briser contre l'arête d'une plaque taillée en biseau. Une partie du courant s'échappe par la bouche à l'extérieur du tuyau ; l'autre partie pénètre au contraire dans l'intérieur. Cette rupture du courant donne lieu à une série de condensations et de dilatations qui se propagent dans la colonne gazeuse. L'air de cette colonne entre en vibration et produit un son continu dont la hauteur, comme on va voir, varie suivant certaines lois. L'embouchure qu'on vient de décrire est celle

qu'on nomme *embouchure de flûte*. L'expérience prouve que si l'on substitue aux mêmes tuyaux des embouchures de formes différentes, on ne fait que modifier le timbre du son, sans changer sa hauteur. Cette hauteur ne dépend pas non plus de la substance, bois, ivoire, métal, verre, etc., qui compose le tuyau, d'où il faut conclure que le son résulte uniquement des vibrations de la colonne d'air.

C'est au père Mersenne et à Daniel Bernouilli que l'acoustique est redevable de la découverte des lois qui régissent les

[illegible]

vibrations des tuyaux sonores [illegible] tement les plus simples [illegible]

Le premier de ces [illegible] sons rendus par deux tuyaux [illegible] reilles, c'est-à-dire [illegible] triples, etc., de [illegible] de vibrations [illegible] vibrations de l'autre [illegible] dans la figure [illegible] l'autre [illegible] grand tuyau [illegible] Mersenne.

Les tuyaux [illegible] parois [illegible]

plique à la fois aux tuyaux fermés et aux tuyaux ouverts, pourvu que leur longueur soit grande comparativement à leurs autres dimensions. Il faut d'abord observer que chaque tuyau peut rendre plusieurs sons, d'autant plus aigus ou élevés que la vitesse du courant d'air est plus grande. Le plus grave de



Fig. 129. — Tuyaux sonores. Lois des vibrations pour les tuyaux ouverts ou fermés, de diverses longueurs.

ces sons est ce qu'on nomme le *son fondamental;* les autres en sont les *harmoniques*, et l'on trouve que, pour les obtenir, il suffit de forcer progressivement le courant d'air. Enfin, quand on fait résonner des tuyaux de longueurs différentes, on reconnaît que les plus longs donnent les sons fondamentaux les plus graves, de telle sorte que les nombres de vibrations sont précisément en raison inverse des longueurs. Par

exemple, pendant que le plus petit des quatre tuyaux représentés dans la figure 129 donne 12 vibrations, les trois autres en donnent dans le même temps 6, 4 et 3 ; c'est-à-dire 2, 3, 4 fois moins, les longueurs étant au contraire 2, 3, 4 fois plus grandes. Je le répète, cette loi est applicable aux tuyaux ouverts comme aux tuyaux fermés.

Mais pour de mêmes longueurs, le son fondamental d'un tuyau fermé est différent du son fondamental donné par un tuyau ouvert. Les vibrations sont deux fois moins nombreuses, ce qui revient à dire que le son fondamental d'un tuyau fermé est le même que celui d'un tuyau ouvert de longueur double.

Il nous reste à dire quelle est la succession des sons harmoniques dans les uns et dans les autres.

En rangeant ces sons dans l'ordre du plus grave au plus aigu, à partir du son fondamental, on trouve que dans les tuyaux ouverts, les nombres de vibrations croissent suivant la série des nombres entiers, 1, 2, 3, 4, 5, 6.... etc. Dans les tuyaux fermés. ces nombres croissent suivant la série des nombres impairs 1, 3, 5, 7.... etc. Il résulte de là que si l'on prend trois tuyaux, l'un ouvert de longueur double des deux autres, et que, de ceux-ci, l'un soit ouvert, l'autre fermé, les sons successifs du premier seront représentés par la série des nombres naturels :

1 2 3 4 5 6 7 8 . .

et les sons des deux autres par les séries :

Tuyau ouvert. . . 2 . . . 4 . . . 6 . . . 8 . . .
Tuyau fermé 1 . . . 3 . . . 5 . . . 7 . . .

c'est-à-dire que les sons du grand tuyau seront reproduits alternativement par les deux tuyaux de longueur moitié moindre.

Terminons l'étude des phénomènes que présentent les tuyaux sonores, en disant que les colonnes gazeuses qui vibrent à l'intérieur de ces instruments se partagent, comme les cordes

13

vibrantes, en parties immobiles ou nœuds, et en parties vibrantes ou ventres. L'existence de ces tranches diverses est rendue manifeste de diverses façons. La plus simple consiste à descendre à l'aide d'un fil une membrane tendue à l'intérieur du tuyau, et à examiner comment se comportent les grains de sable dont on l'a saupoudrée. Ces grains sautillent sous l'impulsion des vibrations, quand la membrane est à la hauteur d'un ventre, comme dans toute l'étendue de la colonne vibrante ; ils restent au contraire immobiles, quand la position de la membrane coïncide avec celle d'un nœud.

Du reste, la théorie a résolu complétement tous les problèmes relatifs à cet ordre de phénomènes, et les expériences des physiciens, toujours un peu moins précises que ne l'exigerait l'analyse mathématique, à cause des circonstances complexes où ils les effectuent, ne sont que des vérifications des lois trouvées par l'analyse. Pour nous, qui tenons surtout à décrire les faits curieux de chaque partie de la physique, nous devons nous borner aux notions indispensables à l'intelligence de ces faits et des applications qu'en ont su faire l'industrie et les arts.

§ VI. VIBRATIONS SONORES DES VERGES ET DES PLAQUES.

Les *verges sonores* sont des tiges cylindriques de bois, de métal, de verre ou d'autres substances élastiques, qu'on peut faire vibrer, en les frottant longitudinalement soit avec un morceau de drap saupoudré de colophane, soit avec une étoffe mouillée. Elles rendent alors des sons purs et continus dont la hauteur, pour une même substance, dépend de la longueur de la tige. A l'aide d'un étau, ou avec les doigts, on pince la verge dont on veut étudier le son, soit à l'une de ses extrémités, soit au milieu, soit en un point intermédiaire de la longueur. La verge est donc libre à ses deux bouts, ou libre seulement à l'un de ses bouts. Or, si l'on compare le son que rend

une verge fixée à l'une de ses extrémités, avec celui que rend la même verge ou une verge de même longueur et de même substance fixée en son point milieu, on trouve que le premier est plus grave que le second : les vibrations sont, dans celui-ci, deux fois plus nombreuses.

Si l'on fait vibrer des verges de longueurs différentes, fixées de la même manière, l'expérience montre que les sons sont d'autant plus aigus que les tiges sont plus courtes. Les nombres de vibrations de ces sons varient en proportion inverse des



Fig. 130. — Vibrations longitudinales des verges.

longueurs. Les vibrations des verges sont donc soumises aux mêmes lois que celles des tuyaux sonores, et l'on voit que si les verges libres aux deux bouts sont assimilées aux tuyaux ouverts, les verges fixées par un bout correspondent aux tuyaux fermés. Comme un tuyau, une même verge, outre le son grave fondamental, fait entendre des sons harmoniques dont les séries ascendantes suivent aussi les mêmes lois que dans les tuyaux ouverts et fermés.

Les phénomènes qui résultent des vibrations sonores dans les corps de formes variées seraient inépuisables. Bornons-nous encore à signaler ceux qui se produisent dans les plaques et dans les membranes.

Si l'on découpe dans des feuilles minces de bois ou de métal bien homogène des plaques carrées, circulaires ou polygonales, puis qu'on les fixe solidement à un pied par leur centre de figure, on parvient à faire rendre à ces plaques des sons extrêmement variés, en frottant leurs bords avec un archet et

en appuyant un ou deux doigts sur tels ou tels points de leur contour (fig. 131). Chladni et Savart, dont les noms se retrouvent dans toutes les recherches modernes qui ont eu le son pour objet, ont multiplié les expériences sur les plaques de formes, d'épaisseurs et de surfaces diverses. Le phénomène sur lequel ils ont le plus appelé l'attention, c'est le partage de la surface des plaques en parties vibrantes et en parties immobiles. Ces dernières n'étant autre chose qu'une série continue de nœuds ont été nommées pour cela *lignes nodales*.



Fig. 131. — Vibrations d'une plaque.

Pour reconnaître et étudier les positions et les formes de ces lignes, ces deux savants physiciens saupoudraient la surface de sable sec et fin. Aussitôt que la plaque entre en vibration, les particules du sable se mettent en mouvement. Elles fuient toutes les parties vibrantes, et se réfugient le long des lignes nodales, en dessinant de la sorte tous leurs contours.

Ces lignes sont si nombreuses et parfois si compliquées, elles varient tellement pour une même plaque avec les sons divers que cette plaque peut rendre, que Savart a dû employer un procédé particulier pour les recueillir. Au lieu de sable, il employait de la poudre de tournesol gommée, et, à l'aide d'un

papier humide appliqué sur la plaque, il obtenait l'impression de chaque figure. Nous reproduisons ici, dans les figures 132 et 133, une série de lignes nodales obtenues par Savart et par Chladni, et nous ferons remarquer que les figures où ces lignes sont le plus multipliées correspondent aux sons les plus aigus,

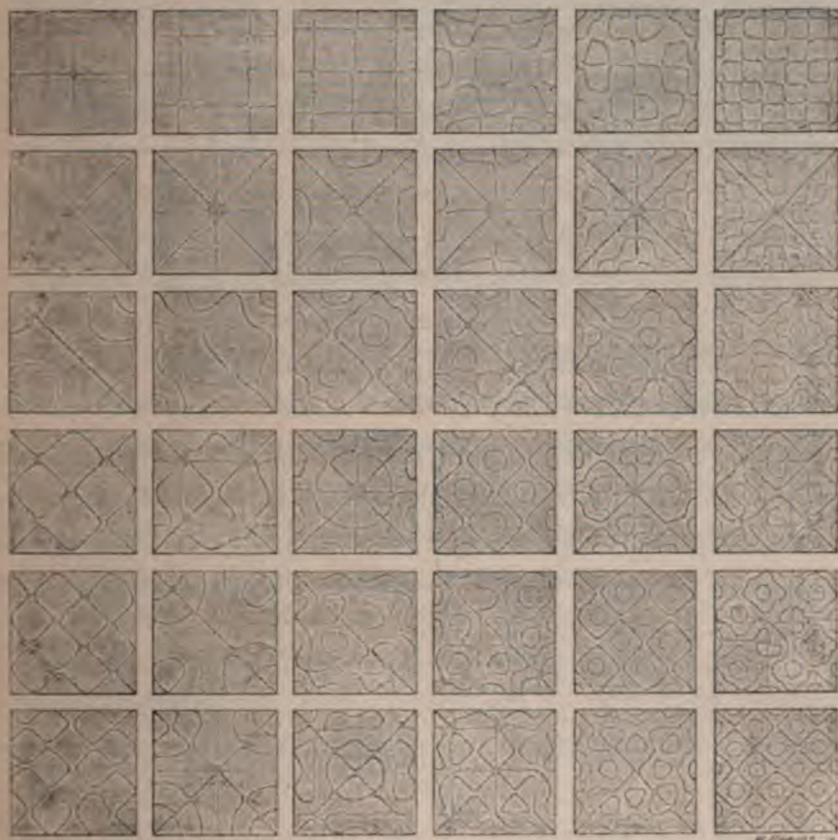


Fig. 132. — Lignes nodales des plaques vibrantes de forme carrée, d'après Savart.

ce qui revient à dire que, à mesure que le son s'élève, l'étendue des parties vibrantes diminue.

Dans les plaques carrées, les lignes nodales affectent deux directions principales, les unes parallèles aux diagonales, les autres parallèles aux côtés de la plaque (fig. 132).

Dans les plaques circulaires (fig. 133), les lignes nodales se disposent soit en rayons, soit en cercles concentriques. Les

cloches de cristal, les timbres, les parois sonores se divisent semblablement en parties vibrantes et en lignes nodales, comme on a pu le voir dans l'expérience du verre rempli

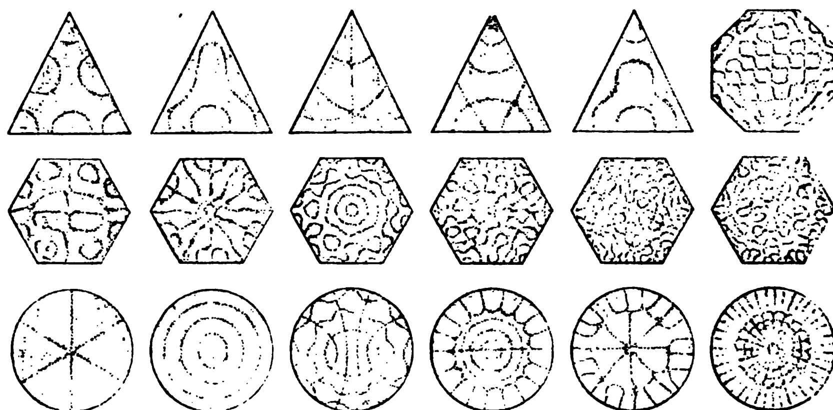


Fig. 133. — Lignes nodales des plaques vibrantes de forme circulaire ou polygonale, d'après Chladni et Savart.

d'eau que représente la figure 109. La figure 134 montre deux modes de vibrations d'une cloche, et la façon dont elle se divise en quatre ou six parties vibrantes, séparées par autant de nœuds. Le premier mode s'obtient en touchant la cloche en

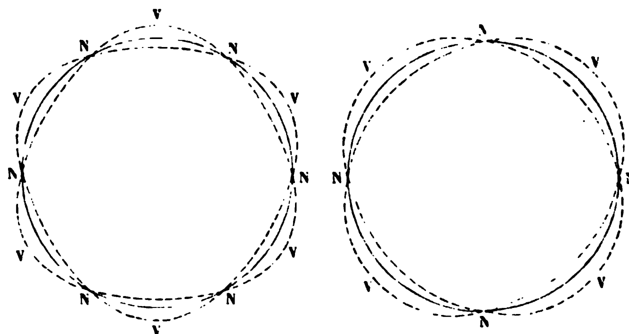


Fig. 134. — Nœuds et ventres d'une cloche vibrante.

deux points éloignés d'un quart de cercle; l'archet s'applique alors à 45 degrés d'un des nœuds. Le son résultant est le plus grave : c'est le son fondamental de la cloche. L'autre mode s'obtient en plaçant l'archet en un point éloigné de 90 degrés

du nœud que l'on forme par l'attouchement. La cloche se diviserait encore en , 10, 12 parties vibrantes. Il en est de même des membranes tendues sur des cadres, et que l'on fait vibrer en les approchant d'un autre corps sonore, par exemple d'un timbre qui résonne. Les vibrations se communiquent par l'air à la membrane, et le sable dont celle-ci est recouverte dessine les lignes nodales.

On a reconnu que, dans le cas où deux plaques de même substance et de figure semblable, mais d'épaisseurs différentes, donnent les mêmes lignes nodales; les sons produits varient avec l'épaisseur, si la surface est la même, c'est-à-dire que les nombres de vibrations sont proportionnels aux épaisseurs. Si c'est l'épaisseur qui reste constante, les nombres de vibrations sont en raison inverse des surfaces.

On ne connaît point encore la loi suivant laquelle se succèdent les sons produits par une même plaque, quand les figures formées par les lignes nodales changent. On sait seulement que le son le plus grave, rendu par une plaque carrée fixée à son centre, a lieu quand les lignes nodales sont deux parallèles aux côtés et passant par le centre : c'est le dessin de la première plaque de la figure 132. Quand ces deux lignes nodales forment les deux diagonales du carré (1re plaque de la seconde ligne, fig. 132), le son est la quinte du premier son, de celui qu'on peut appeler le son fondamental.

CHAPITRE III.

LES SONS MUSICAUX.

§ I. LA GAMME.

La perception des sons a, pour l'ouïe humaine, des limites qu'on a cherché à déterminer par l'expérience, ainsi que nous l'avons dit dans un précédent chapitre. 32 vibrations simples par seconde, voilà pour la limite des sons graves; celle des sons aigus va jusqu'à 73 000 vibrations. Entre ces limites extrêmes, l'échelle des sons est évidemment continue, de sorte qu'il y a une infinité de sons ayant une hauteur différente, appréciable à l'oreille, et passant du grave à l'aigu ou de l'aigu au grave par degrés insensibles.

Tous les sons compris dans cette échelle et susceptibles, par conséquent, d'être comparés entre eux sous le rapport de la hauteur, sont ce qu'on nomme des *sons musicaux;* c'est en les combinant par voie de succession ou de simultanéité, d'après des règles déterminées de temps, de hauteur, d'intensité, de timbre, que le musicien arrive à produire les effets qui constituent une œuvre musicale.

Tous les sons, tous les bruits perceptibles à l'oreille sont-ils des sons musicaux? Non, sans doute, si l'on entend par son musical celui que le compositeur ou l'artiste juge à propos d'introduire dans son œuvre pour concourir à l'effet voulu. Non-seulement ces sons doivent être liés par des rapports déterminés de hauteur; mais il faut, en outre, qu'ils réunissent certaines qualités particulières dont l'examen serait du do-

maine, non de la science, mais de l'art. La question est autre si la dénomination de *son musical* s'applique exclusivement à ceux dont la hauteur est appréciable, que l'oreille peut comparer à d'autres sons plus élevés ou plus graves, dont le nombre des vibrations, en un mot, suivant une loi constante et régulière, peut être évalué. Dans ce cas, les physiciens distinguent les *bruits* des sons proprement dits, des sons musicaux. Souvent le bruit provient d'un mélange confus de sons différents que l'oreille a peine à distinguer les uns des autres, mais dont on conçoit que la séparation est possible. D'autres fois, le bruit n'est autre chose qu'un son dont les vibrations ne se prolongent pas assez longtemps pour que l'auditeur en apprécie la hauteur relative : le claquement d'un fouet, le choc de deux pierres, de deux morceaux de bois l'un contre l'autre et en général de deux corps de faible sonorité, la détonation d'une arme à feu sont des bruits de ce dernier genre; tandis que le grondement sourd d'une mer agitée, le bruissement des feuilles dans une forêt proviennent du mélange d'une multitude de sons ou de bruits confus.

Les tentatives qu'on a faites, pour comparer la hauteur des bruits simples aux sons musicaux, prouvent bien que la distinction dont il est question est plus apparente que réelle. Les physiciens sont parvenus en effet, en variant les dimensions d'une série de billes en bois, à leur faire rendre par le choc les sons de la gamme musicale; mais pour que l'oreille saisisse facilement leur rapport, il importe que les sons se succèdent à de très-courts intervalles. D'autre part, on est arrivé à séparer les bruits formés de sons mélangés entre eux et à distinguer quelques-uns des sons élémentaires dont ces bruits se composent. La sensibilité de l'oreille, jointe à la longue habitude des comparaisons de ce genre, contribue beaucoup à rendre ces distinctions possibles.

Essayons maintenant de donner une idée de la succession et du rapport des sons qui constituent les échelles musicales,

connues sous le nom commun de *gammes*, et qui forment la base physique de la musique moderne.

On donne le nom de *gamme* à une série de sept sons qui se succèdent en procédant du grave à l'aigu ou de l'aigu au grave, et qui sont compris entre deux sons extrêmes offrant ce caractère, que le plus aigu est produit par le double du nombre des vibrations du plus grave. Le son le plus aigu étant le huitième de la série, on dit que les deux sons extrêmes sont l'*octave* l'un de l'autre : l'un est l'octave grave, l'autre l'octave aigu.

Si maintenant l'on part de ce huitième son, considéré comme le point de départ d'une série semblable à la première, et si l'on a soin de composer cette nouvelle série de sons ayant entre eux les mêmes rapports de hauteur que les premiers, on remarquera que l'impression laissée dans l'oreille par leur succession offre la plus grande analogie avec celle qui provient de l'audition des sons de la première gamme. Une mélodie, formée d'une suite de sons pris dans la première série, conserve le même caractère, si on la chante ou si on la joue à l'aide des sons de même ordre pris dans la seconde série. Il en serait de même, si l'on formait de la même manière une ou plusieurs gammes plus aiguës ou plus graves que celles dont nous venons de parler.

Une échelle musicale de ce genre, formée de gammes consécutives est indéfinie, ou, du moins, n'a d'autres limites que celles de la perceptibilité des sons.

Avant de donner les *intervalles* qui séparent les sons successifs de la gamme, ou ce qui revient au même les rapports des nombres de vibrations qui correspondent à chacun d'eux, faisons remarquer que le son d'où l'on part pour former une gamme est nécessairement arbitraire, de sorte qu'il y a un nombre infini d'échelles musicales semblables, mises par la nature à la disposition des musiciens. Mais, dans la pratique musicale, on a senti le besoin de prendre conventionnellement un point de départ fixe, ce qui a conduit à donner aux sons de la gamme des noms particuliers. S'il ne s'était agi que du

chant, ou de la musique exécutée par la voix humaine, une convention de ce genre eût été moins nécessaire ; car la voix est un organe assez flexible pour émettre à volonté des sons à un degré quelconque d'acuité ou de gravité, entre ses limites naturelles. Mais la musique moderne comporte l'emploi simultané du chant et des instruments musicaux ; souvent aussi, dans les symphonies et la musique concertante, les instruments sont les seuls exécutants d'une œuvre musicale. Or, il est un certain nombre de ces instruments qui sont construits de façon à donner des sons fixes, d'une hauteur déterminée, et se trouvent dès lors les régulateurs des sons émis par les autres instruments et par les voix. C'est là ce qui a nécessité l'adoption d'un son normal, d'une hauteur déterminée et constante, produit par un nombre connu de vibrations, auquel on est convenu de comparer tous les autres sons musicaux, et qui sert pour ainsi dire de base à toutes les gammes musicales. Une fois qu'il est bien entendu que cette convention est tout arbitraire, que le nombre des gammes naturelles est illimité, il n'y a plus aucun inconvénient à l'adopter, du moins pour la musique instrumentale.

Voici les noms qu'on donne aux divers sons qui composent une gamme, en passant du son le plus grave au plus aigu :

ut ré mi fa sol la si

D'après ce que nous avons dit de la façon dont se forme la gamme suivante et de l'analogie, sinon de l'identité, qui existe entre les sons de l'une et de l'autre, on comprend qu'on a dû donner les mêmes noms aux sons des gammes successives. Les physiciens les distinguent les unes des autres en faisant suivre les noms des sons d'indices numériques marquant l'ordre de hauteur des gammes. Les deux gammes, l'une immédiatement plus grave, l'autre plus aiguë que la gamme servant de point de départ, à laquelle on donne l'indice $_1$, s'écriront donc ainsi :

ut_{-1} $ré_{-1}$ mi_{-1} fa_{-1} sol_{-1} la_{-1} si_{-1}
ut_2 $ré_2$ mi_2 fa_2 sol_2 la_2 si_2

Il résulte aussi de la constitution des gammes successives que les sons de même nom sont à l'octave les uns des autres, tout comme les sons extrêmes de chaque gamme. Ainsi ut_1, $ré_1$, mi_1, sont les octaves aigus de ut_{-1}, $ré_{-1}$, mi_{-1}.... et les octaves graves de ut_2, $ré_2$, mi_2.

Avant d'aller plus loin, rappelons-nous les lois des vibrations des cordes et des tuyaux, et nous comprendrons que si l'on a tendu une série de sept cordes, de façon à leur faire rendre les sept sons de la gamme, on obtiendra les sept sons de la gamme aiguë, à l'octave de la première, en divisant toutes les cordes en deux parties égales. Si au lieu de cordes, on avait pris sept tuyaux ouverts ou fermés donnant la gamme par leurs sons fondamentaux, il faudrait prendre sept tuyaux de longueurs moitié moindres pour obtenir la gamme immédiatement plus aiguë, sept tuyaux de longueurs doubles pour obtenir les sons de la gamme immédiatement plus grave.

Si l'on compare chacun des sept sons d'une gamme au son le plus grave, à celui qui forme ce que l'on appelle la *tonique*, sous le rapport de leurs hauteurs, on a autant d'*intervalles* différents dont voici les noms :

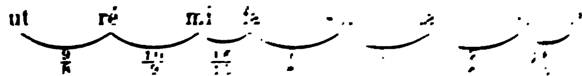
De ut à ut	*unisson.*
ré — ut	*seconde.*
mi — ut	*tierce.*
fa — ut	*quarte.*
sol — ut	*quinte.*
la — ut	*sixte.*
si — ut	*septième.*
Et enfin ut_2 — ut	*octave.*

L'intervalle musical a pour définition, en physique, le rapport des nombres de vibrations des sons dont il est formé. L'unisson et l'octave sont les seuls dont nous ayons donné la valeur : 1 ou $\frac{1}{1}$ mesure l'intervalle de l'unisson ; 2 ou $\frac{2}{1}$ mesure l'octave. Il nous reste à dire quels sont les nombres mesurant les autres intervalles.

Voici ces nombres tels qu'ils sont adoptés aujourd'hui par la majorité des physiciens :

ut — ut	unisson	= 1
ré — ut	seconde	= $\frac{9}{8}$
mi — ut	tierce	= $\frac{5}{4}$
fa — ut	quarte	= $\frac{4}{3}$
sol — ut	quinte	= $\frac{3}{2}$
la — ut	sixte	= $\frac{5}{3}$
si — ut	septième	= $\frac{15}{8}$
ut_2 — ut	octave	= 2

Il est facile, à l'aide de ce tableau de calculer les intervalles consécutifs des sons de la gamme, les rapports des nombres de vibrations de deux sons qui se suivent dans la série. Les voici :



On voit que ces intervalles ne sont pas égaux entre eux. Les plus grands, bien qu'inégaux entre eux, se nomment des *secondes majeures*, et les deux [illegible] *secondes mineures*. Bien que les secondes majeures ne soient pas égales, on est convenu de les confondre sous la même dénomination [illegible] et on dit qu'une gamme se compose [illegible]

[illegible]

La gamme ainsi [illegible] distinguer d'une gamme [illegible] un autre ordre, qu'on [illegible]

L'échelle musicale [illegible]

teur dont les mélodies, renfermées dans un cadre étroit, auraient un caractère de *monotonie* incompatible avec la variété des impressions qu'il veut produire. Pour accroître ses ressources, il passe, dans le même morceau, d'une gamme dans une autre, et c'est à ces transitions, dont les règles sont du ressort de l'art musical, qu'on donne le nom de *modulations*. Les nouvelles gammes ne diffèrent pas complétement de la première, de celles qu'on est convenu d'appeler la gamme naturelle. Certains sons se trouvent seuls modifiés, et d'ailleurs l'ordre de succession et les rapports de hauteur des sons de la nouvelle gamme restent les mêmes.

Écrivons la succession de deux gammes consécutives, à l'octave l'une de l'autre, et ayant pour tonique commune le son *ut* :

ut ré mi fa sol la si ut ré mi fa sol la si ut

Il est facile de voir que par une simple substitution des deux intervalles qui séparent le *mi* du *sol*, c'est-à-dire en faisant suivre le *mi* d'une seconde majeure et précéder le *sol* d'une seconde mineure, on aura une gamme nouvelle présentant la même série d'intervalles que la première, mais commençant par le son *sol* au lieu de commencer par le son *ut*. La voici :

ut ré mi fa♯ sol la si ut ré mi fa♯ sol la si ut

gamme de *sol majeur*.

On voit en effet que les deux premiers intervalles de cette nouvelle gamme sont deux secondes majeures, sol-la, la–si, et qu'ils sont suivis d'une seconde mineure, si–ut, ; qu'ensuite viennent trois secondes majeures ut-ré, ré-mi et mi-fa ♯ ; enfin que la gamme se trouve terminée par un seconde mineure fa♯-sol. Le nouveau son aurait dû recevoir un nom entièrement nouveau ; on le distinguedu *fa* qu'il remplace par le nom de *fa dièze :* on dit que le *fa* naturel a été *diézé*. Partant de la

gamme de sol, et dièzant l'*ut*, on aurait une nouvelle gamme majeure commençant par *ré* et ainsi de suite, ce qui met à la disposition du musicien sept gammes majeures, procédant par dièzes, c'est-à-dire par la substitution successive aux sons primitifs de sons plus élevés, ou de secondes majeures aux secondes mineures.

On peut encore obtenir une suite de gammes majeures en partant de la gamme d'*ut ;* il suffit pour cela d'intervertir l'ordre des deux intervalles *la–si, si-ut*, en remplaçant le *si* par un son plus bas auquel on donne le nom de *si bémol*. On a de la sorte la succession :

ut ré mi fa sol la si♭ ut ré mi fa sol la si♭ ut

gamme de *fa naturel majeur*.

Procédant sur cette gamme nouvelle comme sur la première, on aurait une suite de gammes majeures dans lesquelles un nombre de plus en plus grand des sons primitifs seraient *bémolisés*. Voici le tableau complet des gammes majeures obtenues par ces artifices :

GAMME D'*UT NATUREL MAJEUR*.

		dièzes.			bémols.
gammes de	sol	1	gammes de	fa	1
	ré	2		si♭	2
	la	3		mi♭	3
	mi	4		la♭	4
	si	5		ré♭	5
	fa♯	6		sol♭	6
	ut♯	7		ut♭	7

La série des sons dièzés successivement est celle-ci : fa, ut, sol, ré, la, mi, si. Celle des sons bémolisés est précisément inverse : si, mi, la, ré, sol, ut, fa.

Comme l'exposé complet des règles qui servent à former toutes ces échelles musicales sortirait du cadre de cet ouv bornons-nous à dire que les musiciens emploient au *gammes mineures*, présentant cette particularité que

des intervalles ascendants diffère de celui des intervalles descendants.

GAMME DE *LA MINEUR.*

Intervalles ascendants.		Intorvalles descendants.	
la		la$_2$	
	. . . seconde majeure.		. . . seconde majeure.
si		sol ♮	
	. . . seconde mineure.		. . . seconde majeure.
ut		fa ♮	
	. . . seconde majeure.		. . . seconde mineure.
ré		mi	
	. . . seconde majeure.		. . . seconde majeure.
mi		ré	
	. . . seconde majeure.		. . . seconde majeure.
fa ♯		ut	
	. . . seconde majeure.		. . . seconde mineure.
sol ♯		si	
	. . . seconde mineure.		. . . seconde majeure.
la$_2$		la	

Dans la gamme mineure que nous donnons ici pour type, on voit que les deux sons *fa*♯ et *sol*♯ de la gamme ascendante sont remplacés par les deux sons *fa*, *sol*, dans la gamme descendante : c'est ce que les musiciens indiquent en affectant le symbole de chacun de ces deux sons du signe ♮, qu'on énonce *bécarre* et qui exprime le retour des deux sons dièzés à leur état primitif ou naturel. Le même signe indique aussi un changement de même genre dans un son d'abord bémolisé.

Le premier son d'une gamme détermine le ton du morceau musical où cette gamme est employée, et pour cette raison, il reçoit le nom de *tonique*. Ainsi, on dit le ton d'ut, le ton de sol.... Les physiciens et les musiciens ont eu le tort d'employer ce mot *ton* pour désigner les intervalles de seconde majeure et de seconde mineure, et d'introduire ainsi une confusion de mots qui peut engendrer la confusion dans les idées.

§ II. ÉTUDE OPTIQUE DES INTERVALLES MUSICAUX.

Nous avons décrit diverses méthodes permettant de compter le nombre des vibrations exécutées par un corps so-

nore, au moment où il rend un son déterminé : la sirène, la roue dentée, le vibroscope ou phonautographe sont les appareils employés dans ce but. Dans le dernier de ces instruments, les vibrations elles-mêmes s'inscrivent sur une surface et l'on peut aisément constater leur amplitude et leur nombre : c'est la méthode graphique de l'étude des sons.

Dans ces dernières années, un physicien français, M. Lissajous, a eu l'idée d'étudier à l'aide de l'œil les mouvements vibratoires des corps sonores et de substituer ainsi à l'oreille l'organe de la vue pour l'appréciation des rapports des sons : de là le nom de *méthode optique* donné au procédé qu'il emploie et que nous allons brièvement décrire. A l'aide de la méthode optique, un sourd pourrait donc se livrer à des recherches sur la hauteur comparée des sons.

« Il n'est personne d'entre nous, disait M. Lissajous dans une leçon où il exposait cette nouvelle méthode, qui n'ait, dans son enfance, au risque d'incendier la maison paternelle, plongé une baguette dans le foyer, pour l'agiter ensuite, et suivre avec la curiosité naturelle au jeune âge, ces lignes brillantes produites par l'extrémité embrasée comme par un pinceau magique dont la trace fugitive s'effacerait en un instant. Telle est l'expérience qui a servi de base à la méthode optique. »

Un diapason est, comme on sait, un petit instrument formé d'une double verge métallique dont les branches réunies en fer à cheval sont supportées par une colonne cylindrique servant de pied (fig. 135). A l'aide d'un morceau de bois plus gros que l'intervalle des extrémités des branches, on écarte les deux lames élastiques et leurs oscillations produisent un son dont la hauteur dépend de la forme et des dimensions de l'instrument ; les physiciens le font aussi vibrer en frottant l'une des branches avec un archet[1].

1. C'est à l'aide d'un diapason qu'on règle le ton des instruments ou celui des voix dans les orchestres et les théâtres : le diapason normal est celui qui produit le second *la* du violon, dont le nombre des vibration[illegible] par seconde.

Pour rendre visibles les vibrations d'un diapason, M. Lissajous fixe sur la surface convexe, à l'extrémité d'une des branches, un petit miroir métallique. L'autre branche porte un contre-poids nécessaire pour régulariser le mouvement vibratoire.

« Regardons dans ce miroir, dit-il, l'image réfléchie d'une bougie placée à quelques mètres de distance, puis faisons vibrer le diapason. Nous voyons aussitôt l'image s'allonger dans le sens de la longueur des branches. Faisons tourner alors le diapason autour de son axe, l'apparence change, et nous voyons dans le miroir une ligne brillante et sinueuse dont les ondulations accusent par leur forme même l'amplitude plus ou moins grande du mouvement vibratoire. »

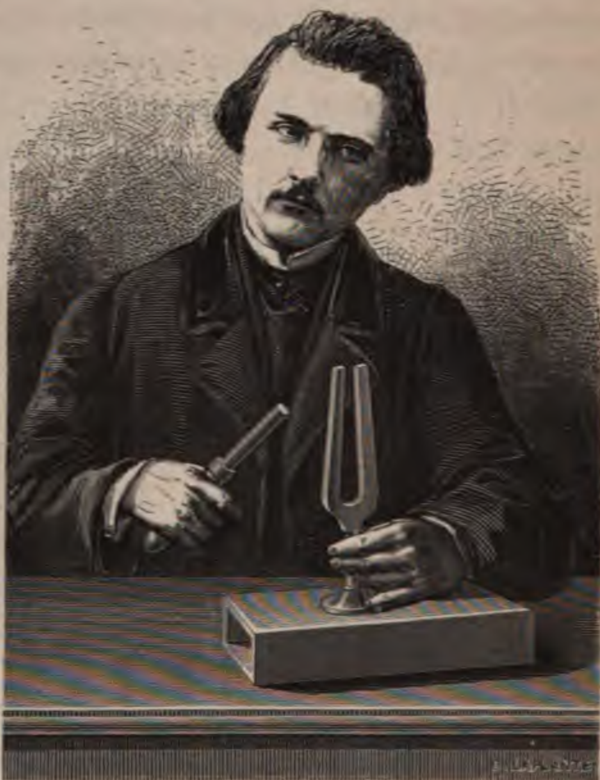


Fig. 135. — Diapason monté sur une caisse de résonnance.

En se servant d'un second miroir qui renvoie l'image su

écran après avoir traversé une lentille convergente, on rend le phénomène visible dans toute l'étendue d'un amphithéâtre. Dans ce cas, on prend une source de lumière plus vive, celle du soleil ou la lumière électrique, et c'est le second miroir qu'on fait tourner autour d'un axe vertical pour obtenir la transformation de l'image rectiligne en une courbe sinueuse.

Il ne s'agit jusqu'ici que de rendre visibles les vibrations d'un corps sonore unique. Voici maintenant comment, par la



Fig. 136. — Étude optique des mouvements vibratoires.

même méthode, M. Lissajous est parvenu à apprécier la hauteur comparative de deux sons, à mesurer le rapport des nombres de vibrations qui correspondent à chacun d'eux. On prend deux diapasons, tous deux armés de miroirs (fig. 136) ; mais, tandis que l'axe de l'un est vertical, l'autre est placé horizontalement de manière à mettre les deux miroirs en regard. Un faisceau de lumière émané d'une petite ouverture tombe sur l'un des miroirs, où il se réfléchit, va frapper le miroir du second diapason qui le renvoie lui-même sur un miroir fixe. Une troisième réflexion projette le faisceau lumineux sur un écran blanc, où l'on aperçoit une image nette et

brillante de l'ouverture, tant que les deux diapasons restent en repos.

Vient-on à faire vibrer le diapason vertical? Aussitôt le mouvement de va-et-vient de l'image donne, au lieu d'un point, une ligne lumineuse, allongée dans le sens vertical. Si, pendant que le diapason vertical est au repos, on ébranle le diapason horizontal, l'image s'allonge dans le sens horizontal. Enfin, si l'on fait vibrer à la fois les deux diapasons, l'image se trouvant animée de deux mouvements simultanés, l'un dans le sens horizontal, l'autre dans le sens vertical, décrira une courbe lumineuse sur l'écran, et la forme de cette courbe dépendra du rapport qui existe entre les durées des deux systèmes de vibrations, de l'amplitude des oscillations et enfin de la durée qui sépare les commencements de deux vibrations consécutives exécutées par l'un et l'autre diapasons : c'est cette dernière durée qui est ce qu'on nomme la *différence de phase.*

M. Lissajous a déterminé de la sorte des courbes lumineuses données par des diapasons accordés de manière à produire les intervalles de la gamme, telle qu'elle est adoptée par les physiciens.

Si les deux diapasons sonnent à l'*unisson*, le rapport des nombres de vibrations est 1 : c'est-à-dire que les vibrations effectuées en des temps égaux sont en même nombre. La différence de phase est-elle nulle, les vibrations commencent en même temps dans les deux diapasons ; il en résulte une ligne droite lumineuse oblique, la diagonale d'un rectangle dont les côtés ont une longueur qui varie avec l'amplitude des vibrations simultanées. Cette ligne droite se change en une ellipse ou ovale, quand la différence de phase n'est pas nulle. La figure 136 montre les courbes que donnent des différences de phases égales à $\frac{1}{8}$ $\frac{1}{4}$ $\frac{3}{8}$ et $\frac{1}{2}$. Elles se reproduisent mais en sens inverse, si les différences sont $\frac{5}{8}$ $\frac{3}{4}$ $\frac{7}{8}$ et 1.

Deux diapasons qui résonnent à l'*octave* l'un de l'autre donnent une série de courbes représentées dans la figure 138 et qui montrent bien que l'un des diapasons exécute une vibration

dans le sens horizontal, tandis que l'autre en fait deux dans le sens vertical. Si les nombres de vibrations sont dans les rap-



Fig. 137. — Courbes optiques représentant les vibrations rectangulaires de deux diapasons à l'unisson.

ports 3:2, 4:3, 5:4, 5:3, 9:8 et 15:8, les diapasons sont accordés aux intervalles de quinte, de quarte, de tierce, de sixte, de seconde majeure et de septième. Voici (fig. 138) les courbes

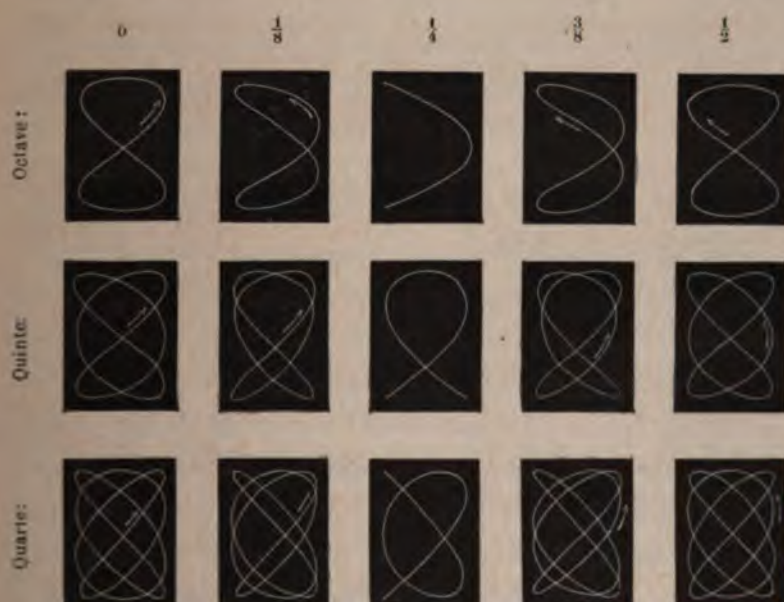


Fig. 138. — Courbes optiques. L'octave, la quarte et la quinte.

optiques obtenues dans les cas de la quarte et de la quinte, avec les variations de forme qui proviennent des différences de phases. A l'inspection de ces courbes, on peut compter le

nombre des excursions faites par le point lumineux dans le sens horizontal et dans le sens vertical, et comme elles s'effectuent les unes et les autres dans le même temps, on a par cela même le rapport numérique des deux sons.

Quand l'accord des diapasons est rigoureux, la même courbe persiste sur l'écran pendant toute la durée de leur résonnance simultanée, et elle finit par se réduire à un point. Si au contraire l'accord n'est point tout à fait exact, si, par exemple, l'octave n'est pas parfait, l'effet est le même que s'il y avait un changement continu dans la différence de phase et la courbe passe insensiblement par toutes les formes indiquées dans la figure. Le temps qu'elle met à accomplir le cercle entier de ces transformations étant noté, on en conclut qu'il y a une différence d'une vibration sur le diapason grave, de deux vibrations sur le diapason aigu relativement au nombre qu'eût donné l'octave juste.

Cette méthode est si précise que la plus faible différence est accusée. Ainsi, supposons d'abord deux diapasons à l'unisson. La courbe optique sera, selon la différence de phase, une de celles que représente la figure 137, et elle persistera pendant toute la durée des vibrations. Qu'on vienne à chauffer légèrement la branche d'un des diapasons, il en résulte un abaissement du son : l'unisson est altéré, et aussitôt l'on voit se produire sur l'écran la variation de forme de la courbe optique qui accuse la cessation de l'accord.

La méthode optique permet, non-seulement de déterminer les rapports des nombres de vibrations, mais aussi de compter le nombre absolu de vibrations qui correspond à un son donné. Ayant ainsi construit un diapason qui donne le *la* normal adopté par les orchestres, il a été facile ensuite de se servir de ce type pour construire des diapasons résonnant à l'unisson.

M. Lissajous a appliqué sa méthode à l'étude des cordes vibrantes, et même à celle des sons propagés par l'air. Pour cela, il éclaire la corde en un de ses points par la projection d'un faisceau lumineux étroit; il reçoit les mouvements de

l'air sur une membrane à la surface de laquelle il fixe une petite perle brillante.

Nous avons oublié de dire que si, dans toutes ces expériences, les courbes tracées par les points lumineux sont visibles à la fois dans tous leurs points, cela tient à ce qu'une évolution entière est terminée avant que la persistance de l'impression de la lumière sur la rétine ait cessé : comme la durée de cette persistance est d'environ un dixième de seconde, cela suppose que tel est, au maximum, le temps employé par l'image du point pour parcourir la sinuosité entière de la courbe.

Telle est, en résumé, la méthode originale employée par M. Lissajous pour rendre sensibles à la vue les mouvements vibratoires des corps sonores, et les plus délicates particularités de ces mouvements. On voit par cet aperçu que nous avions raison de dire qu'une personne privée de la faculté d'entendre pourrait comparer des sons avec une précision plus grande que ne le ferait, par l'audition seule, l'oreille la plus sensible.



Fig. 139. — Tuyau ouvert à flammes manométriques.

Dans ces derniers temps, un savant acousticien, M. Kœnig, a imaginé un autre procédé, aussi très-ingénieux, pour étudier les vibrations des colonnes gazeuses dans les tuyaux. Nous allons essayer d'en donner une idée.

L'une des parois du tuyau sonore est percée d'un certain nombre d'ouvertures, de trois, par exemple, correspondant au nœud du son fondamental et aux deux nœuds de son octave ; chacune de ces ouvertures est fermée par une capsule d'où sort un bec et qui communique avec un tube amenant dans la capsule et dans le bec du gaz d'éclairage. La partie [illegible] sule qui se trouve à l'intérieur du tuyau sonore, au

colonne gazeuse vibrante, est en caoutchouc, elle est légèrement gonflée par le carbure d'hydrogène. Elle est donc éminemment élastique et cède à la moindre augmentation de pression. Supposons le bec de gaz allumé : si la pression intérieure de l'air du tuyau s'accroît, la membrane en caoutchouc est comprimée, de sorte que la capacité de la capsule diminue, et la flamme s'allonge; elle se raccourcit au contraire, si, la pression venant à diminuer, la capacité intérieure de la capsule augmente. On le voit, le bec de gaz est un véritable manomètre, indicateur des changements de pression : aussi, M. Kœnig a-t-il donné aux flammes qui se dégagent des capsules le nom de flammes *manométriques*.

Imaginons maintenant que le tuyau sonore soit adapté à une soufflerie, et qu'on mette en vibration l'air qu'il renferme. Nous savons qu'alors la colonne gazeuse entre en vibration, qu'elle est alternativement condensée et dilatée par la propagation des ondes sonores. Si le son rendu par le tuyau est le son fondamental, c'est au milieu de la colonne gazeuse qu'il se forme un nœud : en ce point, la dilatation et la compression de l'air atteignent leur maximum. Les condensations et dilatations successives se transmettent alors à la capsule manométrique du milieu, dont la flamme s'allonge et se raccourcit alternativement, exécutant une série de mouvements qui accusent l'état vibratoire du corps sonore. Si l'on fait rendre au tuyau l'octave du son fondamental, il y aura un ventre vis-à-vis la capsule du milieu et un nœud à chacune des deux autres. Aussi verra-t-on les flammes extrêmes très-agitées, tandis que celle du milieu restera immobile.

Nous savons que, dans les tuyaux sonores, la colonne gazeuse vibrante se divise en parties séparées par des nœuds, et dont les points milieux sont des ventres de vibrations. En chaque nœud, l'air est en repos, mais sa densité est alternativement maximum et minimum. Chaque ventre, au contraire, est le point où la vitesse d'ébranlement est la plus grande possible, tandis que la densité de l'air y reste invariable. Or, comme les

variations de densité déterminent des variations de pression et que celles-ci se transmettent aux flammes par les membranes des capsules, il en résulte que les flammes manométriques sont très-agitées lorsqu'elles se trouvent en face des nœuds, tandis qu'elles restent en repos, si elles correspondent à un ventre de la colonne vibrante. La méthode de M. Kœnig permet de constater l'existence de ces divers points : en donnant aux flammes une faible dimension, l'agitation qu'elles subissent vis-à-vis les nœuds les fait *éteindre*, tandis qu'elles restent allumées en face des ventres.

Pour rendre plus sensibles les allongements et les raccourcissements de la flamme, M. Kœnig emploie un mode de projection semblable à celui que M. Lissajous a adopté pour la méthode optique. Il place un miroir à côté du bec d'où jaillit la flamme, et lui imprime un mouvement de rotation à l'aide d'une roue d'angle et d'une manivelle. Aussitôt que le tuyau résonne, le miroir tournant laisse voir une succession de flammes séparées par des intervalles obscurs, ou une bande lumineuse à bords dentelés. En plaçant une lentille convergente entre le bec et le miroir tournant, on projette une image nette et brillante sur un écran, où l'on peut alors étudier toutes les particularités du phénomène.



Fig. 150. — Flammes manométriques. Son fondamental et octave aiguë du son fondamental.

Ainsi, dans les deux expériences que nous avons décrites plus haut, où le tuyau rend successivement le son fondamental

et son octave, le changement de hauteur dont il s'agit se m
nifeste immédiatement dans les flammes manométriques, ain
que le marque la figure 140, où la série supérieure repr
sente l'effet produit par les vibrations du son fondamenta
tandis que la série inférieure provient du son qui en est l'octa
aiguë. Le nombre des flammes est double dans le second ca

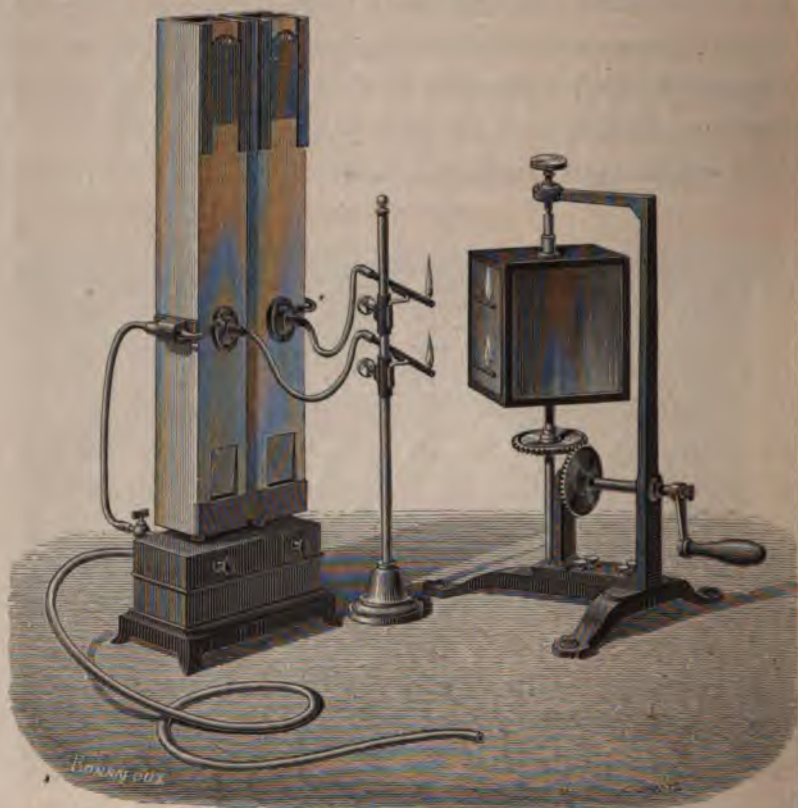


Fig. 141. — Appareil pour la comparaison des mouvements vibratoires de deux tuyaux sonores.

On obtiendrait le même résultat, en adaptant à la souffle
deux tuyaux différents résonnant à l'octave l'un de l'aut
chacun d'eux est muni d'une capsule manométrique, et
flammes réfléchies sur le même miroir tournant donnent
deux séries que nous venons de représenter (fig. 141).

Pour comparer les hauteurs des sons de tuyaux résonnan
des intervalles différents, M. Kœnig emploie encore une au

méthode. Il fait passer le gaz dont la combustion donne les flammes, d'une capsule à l'autre, mais il n'allume qu'un seul des deux becs. En faisant alors résonner simultanément les deux tuyaux, la même flamme se trouve alors agitée par les deux systèmes d'ondes sonores, et l'on voit se succéder sur



Fig. 142. — Flammes manométriques données simultanément par deux tuyaux à l'octave.

l'écran des flammes alternativement grandes et petites, et dont le nombre dépend de l'intervalle musical des sons. « Cette disposition, dit M. Kœnig, est même préférable à la première, chaque fois que les rapports entre les deux tuyaux n'est pas tout à fait simple. Par exemple, pour les tuyaux *ut* et



Fig. 143. — Flammes manométriques de deux tuyaux à la tierce.

mi (tierce), l'observation de quatre images correspondant à cinq devient déjà difficile; mais la succession d'images qui, par groupes de cinq, s'allongent et se raccourcissent, et qu'on obtient dans le miroir tournant par la seconde disposition (fig. 143), n'est pas d'une apparence très-compliquée.

§ III. TIMBRE DES SONS MUSICAUX

Nous avons vu que, parmi les qualités d'un son musical, en est une qui permet de différencier les sons ayant mê hauteur et même intensité. Le *la* d'un violon n'a pas du to le même caractère que le *la* d'une flûte, d'un piano, ou q le *la* émis par une voix humaine; bien plus, sur le même i strument, un son ne résonne pas de la même manière, si façon de le produire change : ainsi le *la* obtenu par la cor du violon vibrant dans toute sa longueur n'est pas identiq au *la* qu'on obtient avec le quatrième doigt pinçant la cor de *ré*. Enfin les voix humaines se distinguent les unes des a tres, comme chacun de nous peut en faire à chaque inst l'expérience, alors même qu'elles émettent des sons de mê intensité et de même hauteur.

Cette qualité particulière des sons est ce qu'on nomme *timbre*.

Pendant longtemps, on n'a eu que des idées fort vagues s la cause de cette modification singulière du son, et les hyp thèses qu'avaient faites plusieurs géomètres, Euler par exemp n'avaient reçu de l'éxpérience aucune vérification. Aujo d'hui, grâce aux travaux d'un physicien allemand contem rain, M. Helmholtz, ce point obscur de la science des sons mis en pleine lumière : la cause du timbre des sons est trouv Des appareils très-ingénieux construits par M. Kœnig en r dent aisée la vérification expérimentale.

Quand une corde, un tuyau, une verge, en un mot un co sonore quelconque rend un son, nous avons vu qu'outre le fondamental dont l'oreille apprécie aisément la hauteur, peut entendre d'autres sons plus faibles, qui correspondei des vibrations de moindre amplitude et de vitesses variab effectuées par diverses parties du corps sonore. La coexiste de ces vibrations donne donc lieu à un son composé : d'

part, le son fondamental le plus intense, puis d'autre part les sons harmoniques, dont les nombres de vibrations sont les multiples entiers du nombre de vibrations du son fondamental.

Mais il y a aussi des sons qui ne sont produits que par un seul mode de vibration, et qu'on nomme pour cela des *sons simples*. Un diapason qu'on fait vibrer à l'orifice d'un tuyau sonore produit par exemple un son simple, sans mélange; les sons de la flûte, celui de la voyelle *ou* de la voix humaine sont des sons composés, mais qui se rapprochent beauceup des sons simples, leurs harmoniques ayant une très-faible intensité. Helmholtz a remarqué, en premier lieu, que les sons simples diffèrent entre eux d'intensité ou de hauteur, mais qu'ils n'offrent pas de différence sensible de timbre. Quant aux sons, composés d'un son fondamental et de sons partiels, mais non harmoniques, leur timbre provient, selon lui, du degré de persistance et de régularité des sons partiels; mais ils sont peu agréables à l'oreille et de peu d'usage en musique : les plaques métalliques, les cloches de verre ou de métal, les membranes donnent des sons de ce genre.

Restent les sons musicaux proprement dits, composés d'un son fondamental et de sons partiels, harmoniques du premier. Pour ces sons, Helmholtz a démontré que les différences de leurs timbres dépendent à la fois de la présence des sons harmoniques supérieurs et de leur intensité relative; mais nullement de leurs différences de phases. Voici comment on peut constater expérimentalement l'exactitude de cette théorie du timbre :

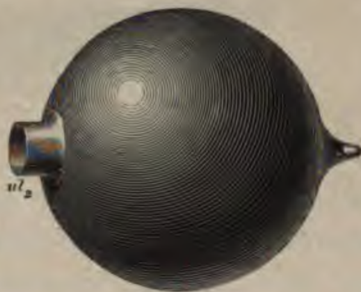


Fig. 144. — Résonnateur de M. Helmholtz.

Une série de globes creux en cuivre, de diverses grosseurs, percés de deux ouvertures d'inégal diamètre, sont construits de telle sorte que dans chacun d'eux la masse d'air intérieure résonne, quand on met en présence de la grande ouverture un

corps rendant un son déterminé (fig. 144). Ces globes se no
ment des *résonnateurs*. Leur propriété consiste donc à renf
cer, par l'entrée en vibration de l'air qu'ils renferment,
sons mêmes pour lesquels ils ont été accordés.

Cela posé, M. Kœnig a construit un appareil formé de h
résonnateurs accordés pour la série des sons harmoniqu
1, 2, 3, 4, 5, 6, etc., par exemple pour les sons ut_2 ut_3 sol_3

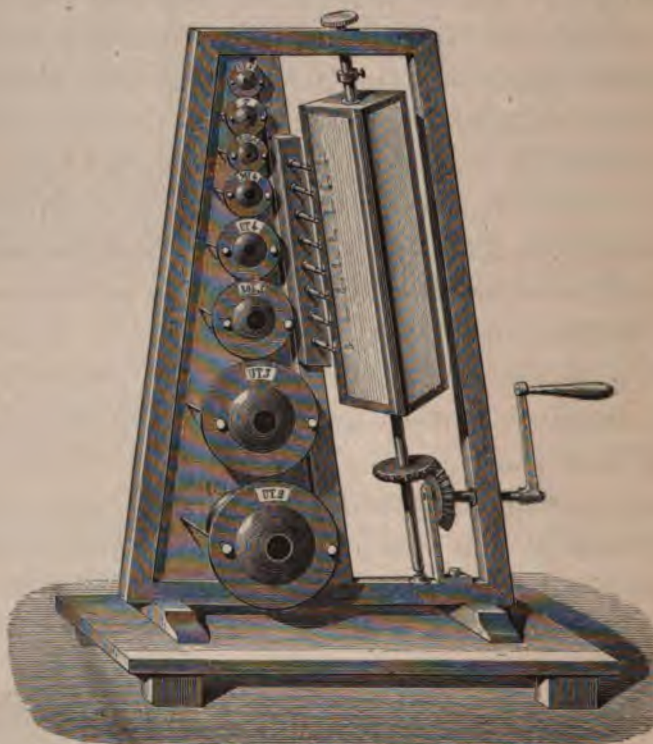


Fig. 145. — Appareil de M. Kœnig pour l'analyse des timbres.

mi_4 sol_4 etc. La figure 145 montre qu'ils sont fixés sur un s
port l'un au-dessus de l'autre. Chacun communique par
tube de caoutchouc partant de la petite ouverture, avec
capsule manométrique ; les becs de gaz de ces capsules se t
vent rangés parallèlement à un miroir tournant, et l'on
voir aisément dans la surface de ce miroir, par l'état de r
ou d'agitation des flammes, quels sont les résonnateurs qui
trent en vibration. Quand on fait vibrer un corps sonore,
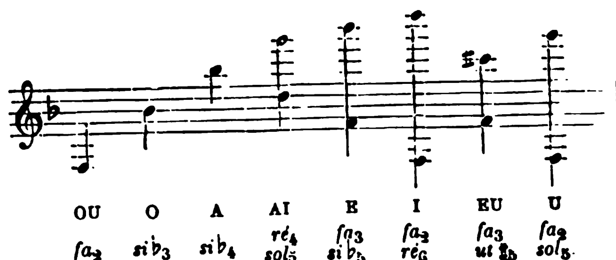
diapason par exemple, et qu'on le promène devant les ouvertures des résonnateurs, le son est renforcé dès qu'il passe devant celui qui rend le son de même hauteur : la flamme de ce résonnateur apparaît agitée dans le miroir. Si donc, on fait entendre un son composé, pour étudier les harmoniques de ce son et leur intensité relative, on promènera le corps sonore devant les ouvertures des résonnateurs, et l'on verra certaines flammes agitées, tandis que les autres restent en repos. L'agitation plus ou moins vive permettra de juger de l'intensité.

C'est ainsi qu'on peut constater ce fait, qu'une variation dans le timbre d'un son de hauteur donnée résulte de la différence des harmoniques qui le composent et de la prédominance de tel ou tel de ces sons secondaires.

Helmholtz a appliqué cette méthode à l'étude des sons émis par la voix humaine ; il a constaté, au moyen des résonnateurs, l'existence des harmoniques, dont les six ou huit premiers sont nettement perceptibles, mais en offrant des variations d'intensité qui dépendent des diverses positions de la bouche, c'est-à-dire des formes que la cavité buccale affecte en prononçant des voyelles différentes. En un mot, « la hauteur des sons de plus forte résonnance de la bouche dépend seulement de la voyelle pour l'émission de laquelle la bouche est disposée, et change d'une manière assez notable, même pour les petites modifications du timbre de la voyelle, comme en présentent les différents dialectes d'une même langue. » Chaque voyelle a donc un timbre spécial qui résulte de la prédominance d'un son harmonique particulier et de hauteur absolue, de sorte que, sous ce rapport, la voix humaine émet des sons qui se distinguent essentiellement des sons émis par les instruments de musique.

Ainsi, la voyelle *a* a pour son spécifique ou caractéristique le *si bémol*$_4$. Quand nous prononçons le son *a*, à une hauteur quelconque, c'est le *si bémol*$_4$ qui est le son dominant, ou de plus forte résonnance, de la cavité buccale. Voici les sons spécifiques correspondant à diverses voyelles. Helmholtz suppose

qu'elles sont prononcées par un Allemand du nord, la difl rence de prononciation pouvant produire des différences da le timbre :



Voici d'ailleurs un mode très–simple de vérification du ti bre des voyelles. Prenez un diapason donnant le si bémol₄, pendant qu'il vibre, tenez-le en avant de votre bouche ; pı prononcez tout bas, sans vous entendre vous–même, les de voyelles *a*, *o*, plusieurs fois et successivement répétées. Vc observerez que le son du diapason est renforcé, toutes les f que votre bouche fait le mouvement particulier à la voyelle tandis qu'il n'est pas modifié par la voyelle *o*. Le même ph nomène se manifesterait pour deux voyelles quelconques, l'on employait un diapason à l'unisson avec le son harmoniq prédominant de l'une d'elles.

Voilà donc une série de phénomènes, inexpliqués jusqu'i dont la production se trouve rattachée aux lois connues (vibrations des corps sonores.

CHAPITRE IV.

L'OUIE ET LA VOIX.

§ I. L'ORGANE DE L'OUIE CHEZ L'HOMME.

Tous les phénomènes physiques se révèlent à l'homme par les impressions qu'ils produisent sur ses organes. Ce sont d'abord pour lui des sensations, simples ou composées, suivant qu'un ou plusieurs sens concourent à leur production. Ainsi c'est par l'intermédiaire de l'organe de la vue, de l'œil, que nous percevons la lumière, par le toucher que nous avons la sensation de la chaleur; l'effort que font nos muscles pour soulever un corps pesant, la vue d'une pierre qui tombe nous révèlent l'existence de la pesanteur; l'oreille enfin nous donne la sensation du son.

Mais, pour étudier les phénomènes en eux-mêmes, pour trouver les conditions et les lois de leur production, il importe que nous démêlions dans les sensations éprouvées ce qui appartient à nos organes de ce qui leur est étranger, extérieur : à cette condition seulement, la nature propre des phénomènes devient accessible à notre intelligence. A la vérité, cette abstraction n'est jamais complète, puisqu'il n'est pas une observation, pas une expérience qui ne nécessite la présence de l'homme et l'intervention de l'un ou l'autre de ses sens pour constater les résultats. Comment donc parvenons-nous à faire abstraction pour ainsi dire de nous-mêmes dans l'étude des phénomènes physiques? C'est en variant de toutes les manières possibles leurs modes de production, ainsi que les métho-

des dont nous nous servons pour les observer ; en un mot, c'est par le contrôle mutuel des sensations les unes par les autres que la vérité peu à peu se fait jour, et que les phénomènes nous apparaissent dans leur indépendance.

Grâce à l'emploi de ces méthodes, nous savons maintenant ce que c'est que le son : nous savons qu'il consiste en un mouvement particulier des molécules des corps élastiques, solides, liquides ou gazeux. Nous avons constaté l'existence des vibrations sonores et étudié leurs lois. Il nous reste maintenant à savoir comment ces vibrations se communiquent à nos organes, jusqu'au moment où faisant, pour ainsi dire, partie intégrante de notre être, l'ébranlement qu'elles communiquent à nos nerfs se transforme en une sensation particulière, qui est la sensation du son. L'oreille est l'appareil spécial, chargé, chez l'homme et chez tous les animaux, de recueillir les vibrations sonores et de les transmettre au nerf auditif. Essayons de faire comprendre, d'après les anatomistes, la disposition et le rôle des diverses parties de cet organe.

Tout le monde connaît l'oreille externe, située de chaque côté de la tête et composée de deux parties, le *pavillon* et le *conduit auditif*.

Le pavillon A (fig. 146) consiste en une membrane cartilagineuse dont la forme varie selon les individus, mais le plus souvent offre le contour d'un ovale irrégulier aminci à sa partie inférieure. Au centre, un entonnoir arrondi évasé, la *conque*, forme l'entrée du conduit auditif B, sorte de tube, de tuyau sonore, qui se termine à une certaine profondeur, au point même où commence ce qu'on nomme l'oreille moyenne. Là, se trouve séparée du conduit auditif par une membrane très-mince et très-délicate C, le *tympan*, une sorte de tambour D, connu sous le nom de *caisse du tympan*. La membrane du tympan est inclinée assez obliquement sur l'axe du conduit auditif, de sorte que sa surface est notablement plus grande que la section droite du conduit, au point de son insertion. La caisse du tympan est percée de quatre ouvertures : deux

sont pratiquées dans la paroi qui fait face à la membrane, et comme l'une est de forme circulaire, l'autre elliptique, on les distingue sous les noms de *fenêtre ronde* et *fenêtre ovale*. A la

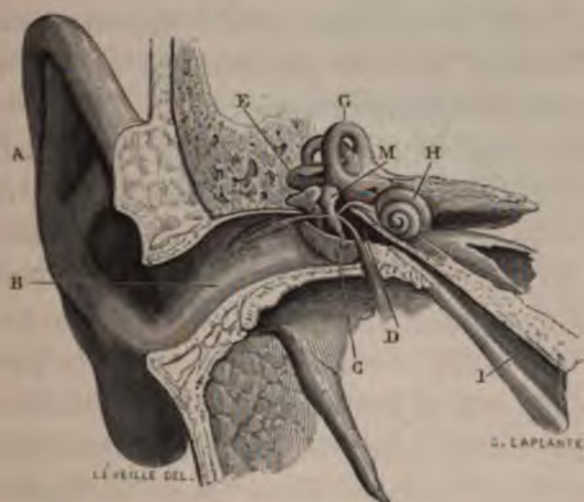


Fig. 146. — L'oreille humaine; vue intérieure.

A Pavillon.
B Conduit auditif.
C Membrane du tympan.
D Caisse du tympan.
E Enclume.
M Marteau.
H Limaçon.
G Canaux semi-circulaires.
I Trompe d'Eustache.

partie inférieure du tympan débouche, par la troisième ouverture, un canal I, qui fait communiquer l'oreille moyenne avec l'air extérieur par l'intermédiaire des fosses nasales. Enfin,



Fig. 147. — Détails de la caisse du tympan.



Fig. 148. — Coupe du limaçon.

une quatrième ouverture se trouve à la partie supérieure de la caisse. A l'intérieur du tympan, on voit une suite de petits os qu'on nomme la *chaîne des osselets* et dont la figure 147 représente les formes et les positions relatives. L'un, le *marteau*

M, s'appuie d'une part sur la membrane du tympan, de l'autre sur l'*enclume* E. Les deux autres sont l'*os lenticulaire* L et l'*étrier* K, ainsi nommés l'un et l'autre à cause de leur forme. La base de l'étrier est unie avec la membrane qui sert de cloison à la fenêtre ovale. Deux petits muscles servent à mouvoir le marteau et l'étrier, et à les appuyer avec plus ou moins de force contre les membranes voisines.

Derrière la caisse du tympan se trouve l'*oreille interne*, qui paraît la partie la plus essentielle de l'organe de l'ouïe. Aussi est-elle protégée par les parties les plus dures de l'os temporal, celles que les anatomistes nomment le *rocher*. Trois cavités particulières composent l'oreille interne, ce sont : le *vestibule* au milieu ; les *canaux semi-circulaires* G à la partie supérieure, et le *limaçon* H à la partie inférieure. Leur ensemble forme le *labyrinthe*, dont l'intérieur est tapissé, dans toute son étendue, d'une membrane que baigne un liquide gélatineux. C'est dans ce liquide que viennent plonger les ramifications du nerf auditif, qui pénètre dans le labyrinthe par un canal osseux nommé *conduit auditif interne*.

Telle est la description des principales parties qui constituent l'organe de l'ouïe chez l'homme : dans la série animale descendante, on voit par degrés disparaître l'oreille externe et l'oreille moyenne, mais à mesure que l'organe se simplifie, les parties restantes sont plus développées. Il nous reste maintenant à dire quel est le rôle joué par chacune d'entre elles.

Évidemment le pavillon est disposé de façon à rassembler et à réfléchir les ondes sonores à l'intérieur du conduit auditif externe. Ce qui le prouve, c'est que les animaux chez lesquels le pavillon est mobile, tournent cette ouverture du côté d'où viennent les sons, dès que leur attention est provoquée. L'homme n'a pas cette faculté ; mais on a observé que les ouïes les plus fines appartiennent aux individus dont le pavillon est le plus écarté du crâne, et tout le monde sait que, pour mieux entendre, il suffit d'en agrandir artificiellement la surface à l'aide du creux de la main. Le conduit auditif externe

transmet, en les renforçant, les vibrations sonores à la membrane du tympan, puis, par la chaîne des osselets, à l'oreille interne[1]. La trompe d'Eustache, en amenant l'air extérieur dans la caisse du tympan, maintient du côté intérieur de la membrane la même pression qu'à l'extérieur, sur la face tournée vers le conduit auditif externe. Quant aux osselets, outre leur fonction de transmettre les vibrations à l'oreille interne plus facilement et plus énergiquement que ne le ferait un corps gazeux, il paraît certain qu'ils servent à tendre la membrane du tympan et celle de la fenêtre ovale, et à les rendre ainsi plus sensibles au mouvement vibratoire. De là, la différence qui existe, au point de vue de la sensation, entre les modes d'audition que la langue caractérise par ces deux mots : *écouter*, *entendre*. La personne qui ne fait qu'entendre éprouve une sensation moins forte, parce qu'elle ne fait point intervenir l'action de sa volonté. Au contraire, dès qu'elle écoute, elle donne instinctivement l'ordre aux muscles du marteau et de l'étrier d'agir; les membranes se tendent, le son paraît plus intense et plus distinct. Cette opinion, émise par Bichat, est adoptée par les physiologistes et les physiciens. Il paraît que le degré de tension de la membrane du tympan varie aussi avec le degré d'acuité ou de gravité des sons à percevoir; pour percevoir les sons aigus, la membrane est plus fortement tendue que s'il s'agit des sons graves.

Nous avons dit plus haut que l'oreille interne est la partie essentielle de l'organe de l'ouïe; et, en effet, il est prouvé par l'observation que la membrane du tympan et les osselets peuvent être perdus sans que la surdité s'ensuive, pourvu toutefois que les deux fenêtres du tympan ne soient pas déchirées, car alors, les liquides qui baignent le nerf auditif venant à s'écouler, les

1. Les parties solides de la tête, les dents transmettent directement à l'oreille interne les vibrations sonores. C'est ainsi que si l'on suspend un timbre à un fil tenu entre les dents, et si l'on se bouche préalablement les oreilles, on entend un son grave transmis par le fil, les dents et les os du rocher jusqu'à l'oreille interne. Les sourds dont l'infirmité n'est due qu'à une conformation vicieuse des organes extérieurs, peuvent entendre de cette façon.

organes de l'oreille interne se dessèchent, perdent leur sensibilité, ainsi que les ramifications du nerf lui-même. En ce cas, il y a surdité absolue. Le nerf auditif distribue ses rameaux en deux branches, dont l'une, celle qui pénètre dans le limaçon, se divise en une multitude de filets très-déliés qu'on nomme les *fibres de Corti*. D'après Helmholtz, ces fibres, dont la longueur varie et qui sont au nombre de plus de 3 000, décomposent les sons en leurs harmoniques, chacune vibrant à l'unisson de l'harmonique avec lequel elle est d'accord. Ces ébranlements partiels donnent ainsi au cerveau la sensation du son fondamental et de son timbre.

D'après les détails qui précèdent, on voit que la théorie de l'ouïe présente encore des obscurités : mais c'est plutôt aux physiologistes qu'aux physiciens qu'il appartient de les dissiper entièrement. Ce qui est admirable dans cette organisation d'un des sens les plus utiles à la conservation de l'individu, à ses relations avec ses semblables et avec le monde extérieur, et qui est la source des jouissances les plus délicieuses et les plus profondes, c'est sa merveilleuse faculté de percevoir une multitude pour ainsi dire indéfinie de sons. Du reste, la coexistence des vibrations dans l'air et dans les milieux propres à propager le son rend compte de cette propriété de l'oreille, qui ne fait que transmettre aux nerfs, et de là au cerveau, les mille modifications des milieux élastiques où nous nous trouvons plongés.

§ II. LA VOIX HUMAINE.

Terminons cette étude des phénomènes du son par une description sommaire de l'organe de la voix chez l'homme, de cet instrument de musique naturel, à l'aide duquel nous communiquons nos idées dans leurs nuances les plus délicates et les plus intimes, instrument si flexible et si complet, que les instruments artificiels les plus perfectionnés n'arrivent point à cette diversité de nuances, de timbres, qui permet à chacun

de nous d'exprimer les sentiments et les passions les plus variés.

L'organe de la voix n'est autre chose qu'un instrument à vent, c'est-à-dire dont les sons sont produits par les vibrations plus ou moins rapides de l'air, à son passage par une ouverture de forme particulière plus ou moins resserrée. L'air arrive des poumons par un tube ou canal annulaire N nommé *trachée-artère;* de là, il pénètre dans le *larynx* M où il entre en vibration et produit les sons de la voix, puis dans le *pharynx*, entonnoir qui continue l'arrière-bouche. Le son arrive alors dans les cavités des fosses nasales et de la bouche qui jouent le rôle de caisses renforçantes et donnent au son un timbre spécial.

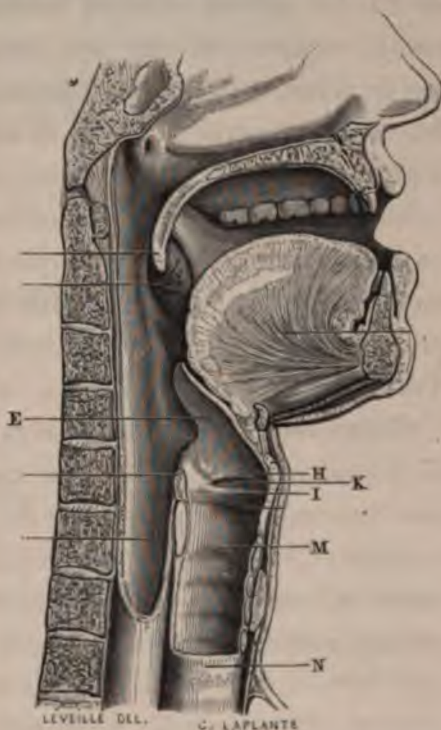


Fig. 149. — Organe de la voix chez l'homme.
Coupe intérieure du larynx.
E Épiglotte. I Cordes vocales.
H Ligaments supérieurs. K Glotte.
N Trachée artère.

La figure 149 montre la conformation intérieure du larynx. C'est, comme on voit, une sorte de boîte cartilagineuse terminée inférieurement par la trachée-artère N, et, à la partie supérieure, par l'*os hyoïde*, en forme de fer à cheval. Une sorte de soupape mobile, l'épiglotte E, peut en s'abaissant fermer le larynx à sa partie supérieure, empêchant ainsi les aliments d'y pénétrer, ce qui produirait l'extinction de la voix ou la suffocation. Au-dessous de l'épiglotte est la *glotte* K, ouverture comprise entre deux systèmes de replis laissant entre eux une cavité qu'on nomme le *ventricule de la glotte*.

Ces replis sont, d'une part, à la partie inférieure de la glotte les *cordes vocales* I, ainsi nommées parce qu'on croyait d'abord que c'étaient elles qui formaient les sons en vibrant sous l'influence de l'air, comme des cordes sonores frottées par un archet; puis, au-dessus, les *ligaments supérieurs* H.

Des expériences dues à des physiologistes ont prouvé que les cordes vocales vibrent comme les anches battantes des tuyaux sonores, et que les sons ainsi produits sont plus ou moins aigus, selon que la tension plus ou moins forte des cordes vocales modifie la forme et les dimensions de l'ouverture de la glotte. Quand le son arrive dans la bouche, sa hauteur est déterminée; il ne subit plus d'autres modifications que celles qui en constituent le timbre ou qui forment la voix articulée. Les mouvements du pharynx, de la langue et des lèvres servent à produire ces divers changements dont nous n'avons point ici à nous occuper.

Disons seulement que les voix d'homme, différant des voix de femme et d'enfant par leur gravité, doivent leur caractère aux dimensions plus grandes du larynx et de l'ouverture de la glotte. Le développement rapide de cet organe chez les jeunes gens, vers l'âge de la puberté, est la cause de la transformation qu'on observe alors dans leur voix.

LIVRE TROISIÈME.

LA LUMIÈRE.

CHAPITRE I.

LES SOURCES LUMINEUSES.

§ I. PHÉNOMÈNES GÉNÉRAUX DE LA LUMIÈRE.

Nous allons pénétrer dans un monde féerique, enchanté, dans un océan de merveilles, où les rubis, les saphirs, les topazes, toutes les pierres précieuses font étinceler leurs feux ; où tous les objets sont d'une splendeur, d'une beauté incomparables, dans le monde de la Lumière enfin et des couleurs.

Ainsi va se dérouler peu à peu devant nous le cycle des phénomènes de la nature. Après avoir étudié les forces physiques dans leur action plus particulièrement mécanique, action si générale et si constante qu'elle nous semble essentiellement liée à l'idée de matière, nous passerons en revue toute une série de phénomènes plus variables, plus directement liés aux mouvements des êtres organisés et dont le principe est une condition de la vie : les phénomènes de la lumière et ceux de la chaleur.

Il nous est difficile, sinon impossible, de nous faire une idée

juste de ce que sont les phénomènes de lumière à la surface des différents corps célestes qui peuplent l'immensité. Mais, sur la Terre, quelle variété et quelle magnificence dans le spectacle dont nous sommes témoins pendant le jour comme pendant les nuits! Si l'œil de l'homme ne peut contempler en face l'astre éblouissant, quand il brille de tout son éclat dans le ciel sans nuages, si même la portion du ciel environnant le disque solaire blesse la vue, en revanche, le paysage tout entier resplendit en nous renvoyant les rayons qui l'inondent. Bien plus, grâce à ce double voyage des rayons de lumière, du Soleil aux objets terrestres et de ceux-ci vers nous, une transformation merveilleuse s'est opérée. C'était un seul ton, une seule couleur que le foyer projetait vers notre atmosphère : c'est une multitude de nuances et de couleurs variées que les objets nous renvoient. Cette métamorphose nous est si familière, que nous ne la soupçonnons même pas : chaque corps nous semble posséder en lui-même cette propriété d'avoir une couleur à lui, et la présence d'une source lumineuse quelle qu'elle soit, ne paraît au premier abord avoir d'autre influence que de la rendre sensible.

La variabilité des circonstances atmosphériques ajoute encore à la beauté du spectacle par les changements continuels qu'elle apporte aux mille nuances de la lumière et des couleurs. Pendant la nuit, le spectacle change : c'est une lumière plus douce qui succède par degrés à l'illumination diurne mais le charme n'en est que plus sensible. La clarté de la Lune à ses diverses phases, les milliers de feux stellaires qui parsèment l'azur sombre de la voûte étoilée, le voile brumeux dont le paysage est enveloppé, multiplient, avec les lueurs du crépuscule et de l'aurore, les décorations variées dont la même scène est susceptible.

La lumière et les couleurs!... il y a là, pour l'artiste, une magie si puissante que souvent, s'éprenant de passion pour elles seules, il arrive à ne plus voir qu'elles et à les considérer comme l'objet même de l'art. Mais il n'est pas besoin d'aller

dans les musées pour jouir de ces belles choses : les Rembrandt, les Lorrain, les Véronèse ont puisé leur inspiration dans la nature même. Il ne sert de rien de posséder de riches écrins pour admirer les merveilles de la lumière. Qui sait observer, peut, sans changer de place pour ainsi dire, les voir s'étaler autour de lui : un rayon de soleil qui pénètre dans sa chambre et traverse un verre d'eau pure, l'horizon du matin ou du soir, les gouttes de rosée qui brillent suspendues comme des diamants ou des perles aux feuilles d'un arbuste, les couleurs irisées d'une bulle liquide, mille autres phénomènes enfin se succédant et se modifiant sans cesse, n'est-ce pas là une inépuisable source de tableaux pour l'artiste, un sujet fécond d'études pour le savant?

La lumière nous donne tout cela : le jour et la nuit, l'illumination éblouissante et les faibles lueurs qui traversent l'obscurité profonde, les couleurs tranchées et leurs nuances innombrables, oppositions et transitions, similitudes et contrastes, et toujours harmonie. Quoi d'étonnant dès lors à ce que les peuples primitifs, dans leur naïve ignorance, aient réservé leurs adorations, par admiration et gratitude, pour l'agent qui leur apportait à la fois lumière et chaleur. Ce fut pour eux le bienfaisant et fécond souverain, le véritable Dieu de l'univers.

La science moderne, moins respectueuse vis-à-vis des agents physiques, mais plus intelligente, a cherché à pénétrer le secret de ces phénomènes de la lumière, et elle est parvenue, à l'aide d'une analyse délicate et profonde, à en découvrir les principales lois. Ce sont les résultats de ces recherches qui vont faire maintenant l'objet de notre exposition.

Mais auparavant, passons rapidement en revue les principales sources de la lumière.

§ II. SOURCES LUMINEUSES.

On peut distinguer les sources lumineuses en deux classes, selon leur origine : les unes, cosmiques, sont extérieures à la

Terre; les autres existent sur notre planète même ou dans son enveloppe atmosphérique.

En première ligne, au nombre des sources lumineuses cosmiques, il faut placer le Soleil. C'est de beaucoup la plus intense de toutes. L'éclat moyen de sa lumière est, d'après Wollaston, 800 000 fois celui de la pleine Lune; et comme la plus brillante étoile du ciel, Sirius, ne donne pas une lumière beaucoup plus forte que la 7000ᵉ partie de la lumière lunaire, il en résulte qu'il faudrait au moins 5 milliards 600 millions d'étoiles sussi éclatantes que Sirius, pour fournir à notre Terre une illumination semblable à celle qu'elle reçoit du Soleil.

Du reste, comme chacun sait, les mouvements de rotation et de translation de notre planète sont tels que la lumière du Soleil est périodiquement distribuée à chacun des points de sa surface. L'éclat en est variable selon la saison et selon l'heure du jour, la hauteur plus ou moins grande du disque solaire au-dessus de l'horizon étant pour beaucoup dans l'intensité lumineuse apparente de l'astre; mais l'interposition des masses vaporeuses qui constituent les nuages, les brumes, les brouillards est susceptible de l'affaiblir considérablement.

La lumière solaire nous parvient quelque temps encore après que le Soleil s'est abaissé au-dessous de l'horizon. Les couches supérieures de l'air restent directement illuminées quand le disque a disparu pour les couches inférieures : telle est la cause du crépuscule, dont la durée se trouve aussi prolongée par un phénomène que nous étudierons bientôt sous le nom de réfraction de la lumière.

Parmi les lumières d'origines célestes, quelques-unes ne sont pas des sources lumineuses directes : ainsi le disque de la Lune, qui donne de temps à autre à nos nuits une clarté si vive, reçoit, avant de la réfléchir vers nous, la lumière même du Soleil. Il en est de même des planètes et de leurs satellites. Mais les myriades d'étoiles que nous voyons briller au ciel pendant les nuits sereines rayonnent vers nous leur propre lumière, semblable à la lumière du Soleil, mais affaiblie pa

la distance [illegible] [illegible] pensées [illegible]

Les sources de [illegible] même [illegible] artificielles [illegible] les [illegible] dans les [illegible] d'étoiles filantes [illegible] Nous pourrons [illegible] êtres organisés [illegible] infusoires marins [illegible] sieurs végétaux et d'un assez grand [illegible]

Tout le monde sait [illegible] lumière par la combustion [illegible] binaison chimique avec [illegible] est aussi une source de lumière [illegible] le verrons bientôt, est [illegible] si grande qu'elle peut seule être comparée [illegible] de la lumière solaire.

Les sources de lumière, dont nous venons de faire l'énumération, peuvent être encore rangées en deux classes, d'après la nature intime des sources : dans l'une sont les corps lumineux proprement dits, dont la lumière ou l'incandescence est due presque toujours à la haute température de la matière qui les compose ; dans l'autre, se trouvent tous les corps qui n'envoient qu'une lumière empruntée aux premières sources.

CHAPITRE II.

PROPAGATION DE LA LUMIÈRE DANS LES MILIEUX HOMOGÈNES

§ I. PROPAGATION DIRECTE DE LA LUMIÈRE.

La lumière se propage, soit dans le vide, soit dans certair milieux solides, liquides ou gazeux. Quand nous disons *le vid* nous entendons, avec tous les physiciens, non pas le vide ab solu, mais un espace entièrement dépourvu de toute substan tangible, comme est probablement l'espace interplanétaire, o encore la chambre barométrique, les ballons d'où l'on a e trait, à l'aide de la machine pneumatique, l'air ou les autr gaz qu'ils renferment. La lumière qui nous arrive du Soleil des étoiles, celle qui traverse les récipients vides de nos lab ratoires, démontrent assez que la lumière n'exige pas, comn le son, un milieu pondérable pour se propager. Quant au pa sage de la lumière à travers l'air et différents gaz, au sein l'eau et d'un grand nombre d'autres liquides, et enfin dans d solides tels que le verre, il n'est pas besoin d'expériences sp ciales pour le constater.

Chacun de nous sait aussi que les corps lumineux par eu mêmes ne sont pas les seuls qui produisent en nous la sensati de la lumière; mais ils servent à éclairer les autres, à les re dre visibles. Les corps ainsi éclairés deviennent alors d sources lumineuses secondaires, d'où la lumière émane po se propager dans les milieux dont nous venons de parl comme la lumière directe. Les corps peuvent donc être rang au point de vue de la propriété qu'ils ont d'émettre, de rec

voir, de renvoyer ou de laisser passer la lumière, en diverses classes : les corps lumineux par eux-mêmes, les corps non lumineux *transparents* et les corps non lumineux *opaques*.

La transparence et l'opacité ne sont jamais absolues. La lumière qui passe au sein d'une masse comme l'air, l'eau, le verre est toujours en partie absorbée, et l'observation fait voir que l'absorption est d'autant plus grande que l'épaisseur traversée par la lumière est plus considérable. Une lame de verre, une couche d'eau d'une faible épaisseur laissent voir les objets avec une grande netteté, mais à mesure qu'augmente cette épaisseur, la netteté s'affaiblit; d'incolore que paraissait d'abord le milieu interposé entre l'œil et les objets, ce milieu prend une nuance de couleur de plus en plus foncée, jusqu'à ce que l'absorption de la lumière devenant totale, on finisse par n'apercevoir plus rien que le milieu lui-même. C'est ainsi qu'un disque blanc, plongé dans la mer, en face de la côte de Civita-Vecchia, alors que l'eau était parfaitement claire, d'une belle couleur et d'une grande pureté, disparaissait entièrement à une profondeur de 45 mètres au plus (expériences de M. Cialdi). « La couleur du disque devenait d'abord légèrement verdâtre, puis elle virait au bleu clair, et ce bleu s'assombrissait au fur et à mesure qu'on laissait descendre l'appareil, jusqu'à ce que sa couleur, étant devenue aussi sombre que celle de l'eau, il ne fut plus possible de la distinguer du milieu environnant. » Des disques teints en jaune et de couleur de vase de mer disparaissaient, dans les mêmes circonstances, à des profondeurs de 17 et de 24 mètres.

La transparence des gaz, de l'air atmosphérique quand il est bien pur, est beaucoup plus étendue. D'un sommet très-élevé comme celui du mont Blanc, l'œil jouit d'un panorama immense, et distingue encore les objets à une distance considérable. D'après M. Martins, la portion de la surface de la Terre, géométriquement visible du haut du mont Blanc, a un rayon de 210 kilomètres. On pourrait donc, si la transparence de l'air était absolue, apercevoir le golfe de Gênes; mais, « au

delà de 100 kilomètres, les objets voilés par le hâle so fus et effacés. Jusqu'à 60 kilomètres tout est net et rec sable. » Sans aucun doute, des points lumineux serai pendant la nuit jusqu'à la limite du cercle de visibilit était l'opinion de M. Martins et des savants qui l'ac gnaient, puisqu'ils s'étaient proposé d'échanger des s de feu avec la ville de Dijon, qui est un des points de mense horizon.

Outre les corps transparents ou diaphanes, il y a le simplement *translucides*, laissant passer la lumière sa mettre de distinguer les couleurs ni les contours des le verre dépoli, le papier, la corne, l'albâtre, certains l comme le lait. En mouillant le papier ou en le rec d'une mince couche d'huile, sa translucidité augmen change même en transparence quand le papier est s ment mince.

Les corps mêmes qu'on croirait doués d'une opacité a laissent passer une certaine quantité de lumière lorsqu réduits en lames d'une très-petite épaisseur : ai pierres, le bois, les métaux, une multitude d'autres sul sont opaques. Cependant, si l'on place entre l'œil et la du jour une feuille d'or, — les batteurs d'or en nent de si minces que 10 000 superposées n'ont que seur d'un millimètre, — on aperçoit une belle coule qui témoigne de la transmission de la lumière, no travers les fentes produites par le battage, mais substance même du métal. C'est sans doute l'extrême p des objets dont les micrographes étudient la structure — infusoires, microphytes, etc., — qui explique leu parence.

Quand la lumière émise par une source lumineuse un corps éclairé parvient à notre œil, elle n'a pu le fai traversant des milieux diaphanes ou translucides. Quel a-t-elle suivie dans sa propagation, et qu'arrive-t-il,

son chemin elle rencontre des corps d'une plus ou moins grande opacité? Tels sont les problèmes les plus simples dont les physiciens ont demandé la solution à l'expérience en étudiant les phénomènes qui se manifestent dans ces circonstances.

Le cas le plus simple est celui où la lumière traverse un milieu transparent parfaitement homogène, c'est-à-dire ayant la même densité et la même composition dans toutes ses par-



Fig. 150. — Propagation de la lumière en ligne droite.

ties, et arrive directement à l'œil. L'expérience prouve alors qu'elle se propage en ligne droite.

Entre la flamme d'une bougie et l'œil, interposez une suite d'écrans opaques, percés chacun d'un petit trou; vous reconnaîtrez qu'il faut, pour apercevoir la lumière, placer tous les trous des écrans en ligne droite avec elle. Le jour ne peut se voir au travers d'un long tube, si ce tube n'est pas rectiligne, ou du moins si sa courbure est trop forte pour qu'une ligne droite ne puisse le traverser de part en part sans toucher les parois. Enfermez-vous dans une chambre parfaitement close et obscure, et ne laissez passer la lumière

du soleil que par un petit trou pratiqué dans le volet aussitôt vous verrez un cône lumineux marquer dan le passage de la lumière, et vous constaterez aisémen les contours de ce cône sont parfaitement rectilignes. ce cas, ce n'est pas l'air lui-même qu'on aperçoit, bien les parcelles de poussière en suspension dans que leur illumination rend visibles sur le fond obscur chambre.

On peut constater encore la propagation de la lumi



Fig. 151. — Propagation rectiligne de la lumière.

ligne droite quand le soleil, caché par une accumulati nuages, laisse jaillir ses rayons entre les ouvertures des On voit alors se projeter dans l'atmosphère des traînées p moins lumineuses qui affectent très-visiblement une dir rectiligne. Mais nous verrons bientôt que l'atmosphère composée de couches de densités variables, la lumière q verse successivement ces couches ne s'y meut plus en droite. A la surface même de la Terre, pour que ce m ment soit rigoureusement rectiligne, il faut que le transparent, nous le répétons, soit parfaitement homo que ce milieu soit d'ailleurs de l'air, un gaz quelconqu l'eau, du verre, etc.

C'est le moment de dire ce que les physiciens entendent par *rayon*, *faisceau*, *pinceau* lumineux.

La lumière émane ou rayonne des corps lumineux dans toutes les directions, et se propage en ligne droite, comme nous venons de le voir dans les milieux homogènes. On nomme *rayon lumineux* la série des points considérés simultanément ou successivement, dont l'une quelconque des lignes suivies par la lumière se compose; *pinceau lumineux*, l'ensemble d'un petit nombre de rayons partis du même point, et *faisceau lumineux* la réunion de plusieurs rayons parallèles. Les pinceaux lumineux ne sont autre chose, on le voit, que des pyramides ou des cônes ayant leurs sommets en un point de la source. Mais quand la source lumineuse est très-éloignée, comme il arrive pour le Soleil et les étoiles, les rayons partis d'un même point de la source ont une divergence si faible, qu'on peut les considérer comme rigoureusement parallèles.

§ II. OMBRES ET PÉNOMBRES.

S'il n'y avait dans la nature que des corps lumineux par eux-mêmes et des milieux d'une absolue transparence, nous ne verrions que les premiers. Non-seulement cette transparence des milieux n'est pas parfaite, mais encore une multitude de corps s'opposent au passage de la lumière, la renvoient dans tous les sens et deviennent éclairés ou visibles. De là aussi l'obscurité et les ombres.

Quand un corps opaque est en présence d'un point lumineux et à une certaine distance de ce point, une partie du corps est éclairée; l'autre partie ne reçoit aucun rayon de lumière. Elle est dans l'ombre. De plus, toute une portion de l'espace située du côté de la surface obscure du corps ne reçoit non plus aucune lumière, comme on s'en assure aisément en plaçant un écran derrière le corps et en observant l'*ombre portée* sur l'écran. Le point lumineux est, dans ce cas, le sommet d'un cône

tangent aux contours du corps opaque, cône lumineux
sa partie antérieure et obscur dans son prolongement,
nomme alors cône d'ombre. Dans ce cas qui n'est j

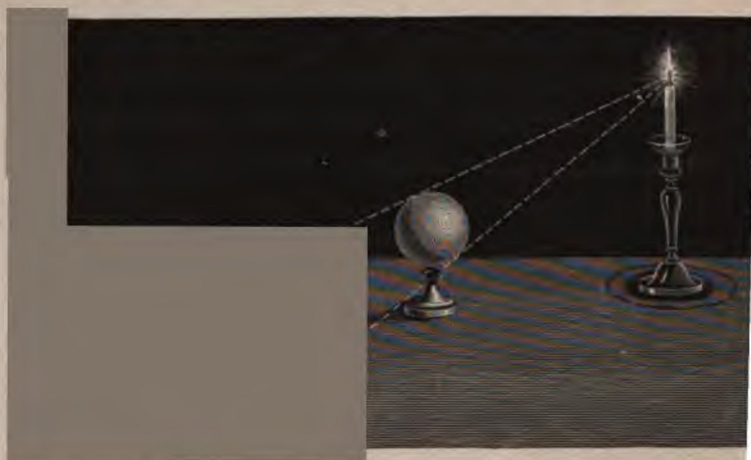


Fig. 152. — Cône d'ombre d'un corps opaque. Ombre portée.

rigoureusement réalisé, la portion du corps opaq
éclairée est totalement invisible; et la ligne de sépara
l'ombre et de la lumière est rigoureusement tranchée.

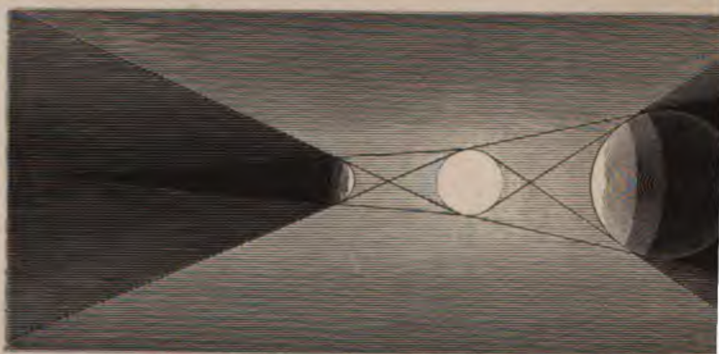


Fig. 153. — Cônes d'ombre et de pénombre.

Il n'en est pas ainsi, quand la source est un corps lu
de dimensions finies. La figure 153 montre alors n
que la surface du corps éclairé se divise en trois partie
dont les points sont éclairés à la fois par toute la

lumineuse ; l'autre, qui ne reçoit aucun rayon ; la troisième, intermédiaire entre les deux autres, ne reçoit qu'une fraction de la lumière totale et constitue ce qu'on nomme la pénombre. L'espace situé derrière le corps opaque, à l'opposé de la source lumineuse, se divise pareillement en un cône d'ombre absolue et en un cône enveloppant le premier qui est le cône



Fig. 154. — Silhouettes des cartes découpées ; effet d'ombre et de pénombre

de pénombre. En dehors de ce double cône, l'espace est entièrement éclairé. Si le corps lumineux est plus grand que le corps opaque, le cône d'ombre est limité ; c'est un cylindre si les deux corps sont égaux, et enfin un cône divergent, si le corps opaque est plus grand que le corps éclairant.

La pénombre donne aux contours des corps éclairés et arrondis, cette teinte fondue qui rend moins tranchant et

moins dur le contraste des ombres et des lumières. C
le cône de pénombre va en s'évasant de plus en plus,
résulte que les ombres portées par un corps opaque é
sont d'autant moins vives, moins nettes, que sa di:
à l'écran est plus grande, ce que chacun de nou:
constater avec facilité. Les cartes découpées, qu'on
en jouet aux enfants, sont une application de l'ef
clair obscur produit par les pénombres. Quand la car
très-voisine du mur ou de l'écran sur lequel l'ombre s
jette, cette ombre est tranchée, et l'effet que l'artist
proposé de rendre n'est pas obtenu ; à une distance c
nable, les pénombres, plus étendues, produisent l'effet
(fig. 154) ; enfin, si cette distance est trop grande, l'ima
vient tout à fait confuse.

§ III. LA CHAMBRE OBSCURE. — IMAGES RENVERSÉES.

La propagation de la lumière en ligne droite donne l'e:
tion des phénomènes qu'on observe dans la chambre ol

Enfermez-vous dans une chambre dont la fenêtre e:
métiquement close ; un très-petit trou est pratiqué da
portion très-mince du volet, et c'est par ce trou seul c
rayons d'un corps lumineux, ceux du soleil par exempl
vent pénétrer dans la chambre. Placez alors un écran
à une certaine distance du trou. Vous verrez une tache
neuse de forme circulaire ou elliptique, d'autant plus ;
que la distance de l'écran à l'ouverture est elle-mêm
considérable (fig. 150). C'est l'image du soleil.

Si, au lieu de la lumière solaire, c'est celle d'une bou
pénètre dans la chambre noire, vous verrez, reprodu
l'écran, l'image de la bougie et de sa flamme, mais l
est renversée. La raison de ce renversement est fort :
Les rayons qui partent de l'extrémité supérieure de la f
passent par le trou, continuent leur route en ligne

dans la chambre obscure et donnent un point lumineux à la partie inférieure de l'écran. Ceux, au contraire, qui partent de la base de la flamme vont former leur image en un point plus élevé : les rayons intermédiaires donnent des traces lumineuses entre ces deux points. L'image est donc tout naturellement renversée, et l'on s'explique ainsi à la fois pourquoi cette image existe et pourquoi elle offre cette disposition particulière. Une carte percée d'un trou très-fin, à l'aide d'une



Fig. 155. — Image renversée d'une bougie.

aiguille, par exemple, donne sur un écran l'image renversée de la bougie (fig. 155). La forme de l'ouverture est d'ailleurs indifférente : ronde, carrée ou triangulaire, elle donne toujours l'image de la source avec sa forme rigoureusement semblable. Supposons en effet l'ouverture de forme triangulaire ; laissons-y pénétrer les rayons du soleil et recevons-les sur un écran placé normalement à leur direction. Chaque point du disque donnera un faisceau de lumière, qui, pénétrant par le trou, sera coupé sur l'écran selon une section de même forme que l'ouverture, c'est-à-dire triangulaire. Tous ces éléments

se superposeront, et comme il n'est pas un point du c du disque qui ne donne le sien, il en résulte que la for l'image sera circulaire comme celle du soleil.

Cela explique pourquoi, dans l'ombre projetée par un la lumière qui pénètre dans les intervalles laissés p feuilles a toujours une forme circulaire ou elliptique, s



Fig. 156 — Images du soleil à travers les ouvertures du feuillage.

que les rayons tombent perpendiculairement ou obliqu sur le sol. Pendant les éclipses de soleil, on peut ob que ces images de l'astre affectent la forme d'un cr lumineux, d'autant plus échancré que le disque solair lui-même davantage.

Si le volet de la chambre obscure est en face d'un p éclairé par le soleil, ou même par la lumière diffus

réfléchit un ciel clair, chaque objet viendra peindre son image sur l'écran, image renversée comme on l'a vu tout à l'heure, et l'on aura une reproduction fidèle du paysage (fig. 157). Si l'écran est bien blanc, toutes les couleurs et leurs nuances s'y trouveront admirablement peintes; mais l'image aura d'autant plus de netteté que l'ouverture sera plus petite et le paysage plus éloigné.



Fig. 157. — Chambre obscure. — Image renversée d'un paysage.

§ IV. VITESSE DE PROPAGATION DE LA LUMIÈRE.

En disant que la lumière se propage, on admet implicitement qu'elle ne se transmet pas instantanément d'un point à un autre; qu'elle met un certain temps pour parcourir la distance qui sépare l'objet lumineux de l'œil où elle pénètre ou de l'objet qu'elle éclaire. C'est là une vérité que plusieurs philosophes et savants avaient depuis longtemps soupçonnée, mais dont la démonstration remonte à deux

siècles à peine. La vitesse de la lumière est si grande
sembla d'abord infinie, du moins pour les distance:
peut mesurer à la surface de la Terre. En une secoı
lumière franchit en effet un intervalle qui n'est pas n
de 298 000 kilomètres, ou de 74 500 lieues. Elle
donc guère plus d'une seconde pour venir de la Lu
Terre ; mais il lui faut 8 minutes 13 secondes pour veni
leil, voyage bien rapide néanmoins, si l'on songe qu'ur
de canon mettrait près de 12 ans à l'accomplir, en suj
qu'il conservât pendant tout ce temps une vitesse de 500
par seconde. Enfin la vitesse de la lumière, 900 000 f
grande que celle du son dans l'air à 0°, vaut encore 10(
la vitesse de translation de notre planète dans son orbi

Comment est-on parvenu à mesurer un mouvemeı
rapide? Voilà ce que nous allons essayer de faire comp

Imaginons qu'un phénomène lumineux, l'inflammati
tas de poudre par exemple, se reproduise périodique
des intervalles de temps parfaitement égaux, de 10 en
nutes. Quelle que soit la distance de l'observateur à l
où a lieu le phénomène, il est évident qu'à partir de
mière explosion, toutes les autres se succéderont pou
des intervalles successifs de 10 minutes, que la vitess
lumière soit faible, considérable ou infinie, pourvu qu
servateur reste à une distance constante du point où
les explosions.

Mais si l'observateur s'éloigne à partir de l'instant
vu la première explosion, il est évident qu'il constat
retard à chacune des explosions suivantes, retard qu
augmentant et sera dû au temps que la lumière met
courir le chemin marquant l'accroissement de la dist
la douzième explosion par exemple, s'il s'est éloi
20 kilomètres, et qu'il ait constaté un retard de 2 secor
devrait-il pas en conclure que la lumière franchit 1
mètres par seconde? La même conséquence devrait êt
d'une expérience analogue, si, au lieu de l'apparitio

point lumineux, c'était la disparition périodique d'une lumière qui fût l'objet de l'observation.

Or, un phénomène de ce dernier genre a lieu dans le ciel. La planète Jupiter est accompagnée, dans son mouvement de translation autour du Soleil, de quatre satellites qui circulent autour d'elle dans des périodes régulières. Les plans dans lesquels s'effectuent les mouvements de ces petits corps coïncident, à peu de chose près, avec le plan de l'orbite de Jupiter. Or, Jupiter étant opaque, projette derrière lui, c'est-à-dire à l'opposé du Soleil, un cône d'ombre dont l'axe est couché sur le plan de son orbite. Il en résulte que, dans leurs révolutions successives autour de la planète centrale, les satellites viennent traverser ce cône à l'époque de leurs oppositions. Pendant toute la durée du trajet dans l'ombre, la lumière que ces corps recevaient du Soleil est interceptée : ils subissent une éclipse.

Les éclipses des satellites de Jupiter, surtout celles des trois satellites les plus voisins de la planète, sont très-fréquentes ; et, de la Terre, il est aisé d'observer leurs émersions et leurs immersions en s'aidant d'une lunette de moyenne puissance. Quand le point lumineux, entraîné par son mouvement de révolution autour de la planète, vient à pénétrer dans le cône d'ombre, sa lumière s'éteint : c'est l'instant d'une *immersion*. Il continue alors sa course dans l'ombre jusqu'au moment où, sortant du cône, sa lumière reparaît : c'est le moment de l'*émersion*. Ces deux phénomènes ne sont pas visibles de la Terre, pendant la même éclipse, pour les deux satellites les les deux plus voisins de Jupiter, ces satellites se trouvant masqués par le corps opaque de la planète tantôt au moment de leur immersion, tantôt au moment de leur émersion. De plus, on ne peut les observer d'aucune façon à l'époque de la conjonction ou à celle de l'opposition, le cône d'ombre se trouvant entièrement caché par le disque de la planète, ainsi qu'on peut aisément s'en rendre compte à l'aide de la figure 158. Il est tout aussi facile de voir pourquoi ce sont les immersions qui sont visibles pour nous, depuis l'époque de la conjonction jus-

qu'à l'opposition suivante, tandis que les émersions a
traire sont visibles de l'opposition à la conjonction.

Jupiter, en effet, se meut dans le même sens que la
mais beaucoup plus lentement qu'elle dans son orbite.

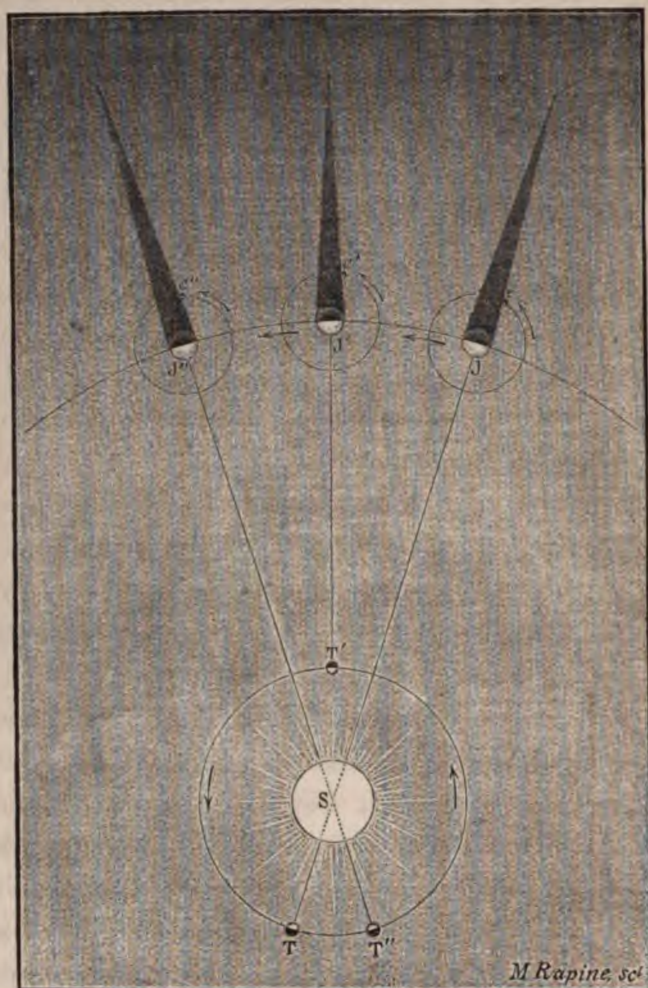


Fig. 158 — Mesure de la vitesse de la lumière par les éclipses des satellites de

la Terre est en T et que Jupiter est en J sur le prolon
du rayon vecteur TS, c'est l'époque de la conjonction.
de cet instant, la Terre décrivant un certain arc sur son
et Jupiter un arc de moindre amplitude sur la sienne,
vateur se trouve porté à la droite du cône d'ombre

piter, et dès lors peut voir les immersions des satellites. Les mêmes circonstances ont lieu jusqu'à l'instant où, la Terre étant en T', Jupiter est en J', toujours sur le prolongement du rayon, mais à l'opposé du Soleil, c'est-à-dire jusqu'à l'opposition. Alors, par le fait des mouvements simultanés de la Terre et de Jupiter, la première de ces planètes se porte à gauche du cône d'ombre projeté par la seconde, et ce sont les émersions des satellites qui sont visibles, jusqu'à la nouvelle conjonction T'' J''.

Ces préliminaires bien compris, nous allons pouvoir facilement expliquer comment les astronomes ont pu déduire la vitesse de la lumière des observations des éclipses dont nous venons de parler.

Considérons, par exemple, le premier satellite de Jupiter, c'est-à-dire le plus voisin de la planète. Son mouvement de révolution est connu avec assez de précision pour que l'on puisse calculer avec une grande exactitude les intervalles de ses éclipses, c'est-à-dire les intervalles qui séparent soit deux immersions, soit deux émersions consécutives. Or, l'observation fait voir que les durées de ces intervalles ne sont pas constantes; qu'elles semblent se raccourcir à mesure que la Terre se rapproche de Jupiter, pour s'agrandir au contraire à mesure qu'elle s'en éloigne, tandis qu'elles sont sensiblement égales, aux deux époques où la distance de la Terre à Jupiter varie peu, c'est-à-dire à la conjonction et à l'opposition. Si donc on calcule, d'après la durée moyenne des intervalles séparant deux immersions successives, l'époque d'une future immersion, et que l'on compare le résultat du calcul avec celui donné par l'observation, on trouvera que le phénomène semble en retard, si la Terre s'est éloignée de Jupiter, qu'il paraît au contraire en avance, si elle s'en est rapprochée. De plus, le retard ou l'avance se trouve toujours en proportion exacte avec l'augmentation ou avec la diminution de distance des deux planètes.

Il n'est donc pas douteux que la différence entre le résultat

du calcul et l'observation ne provienne du temps que lumière à parcourir les distances inégales dont nous ver parler.

On a trouvé que, de la conjonction à l'opposition l'opposition à la conjonction, les accumulations success ces différences produisaient une avance ou un retar d'environ 16 minutes 30 secondes. Or, les distances T surpassent la distance TJ' d'une même quantité, qui e cisément le diamètre de l'orbite terrestre. Il faut donc nutes 30 secondes à la lumière pour franchir la longı ce diamètre, ou, si l'on veut, 8 minutes 15 secondes po courir sa moitié, qui est la distance du Soleil à la Terr à peu près à 147 500 000 kilomètres.

C'est, comme nous l'avons dit plus haut, une vit 298 000 kilomètres ou de 74 500 lieues par seconde.

La découverte de la vitesse de la lumière par les des satellites de Jupiter est due à Rœmer, astronome qui l'exposa dans un Mémoire présenté à l'Académ sciences en 1675. Depuis Rœmer, la découverte de l'*abe* par Bradley vint confirmer à la fois et le mouvement de lation de la Terre et la propagatien successive de la l dans l'espace. On voit, du reste, que l'exactitude du r qui mesure la vitesse de la lumière dépend ici de la c sance de la distance du Soleil. Il en est de même qu déduit cette vitesse de l'*aberration*. Mais, dans le p cas, c'est la vitesse dans le vide des espaces célestes, que, dans le second cas, c'est celle de la lumière dan Les deux méthodes ont donné des résultats à peu près dants.

Enfin, dans ces dernières années, deux savants, MM. et Foucault, sont parvenus, chacun de leur côté, à m directement la vitesse de la lumière, par des méthodes ment physiques. Voici quelle est en substance la m imaginée par M. Fizeau.

A l'aide de l'appareil que représente la figure 159, il

un faisceau de rayons lumineux émanés d'une lampe, de Suresnes, — c'est le lieu où il s'était établi, — à Montmartre, où se trouve disposé un miroir réfléchissant la lumière et la renvoyant précisément au point de départ. La lumière de la lampe vient d'abord tomber, après avoir traversé un système de deux lentilles sur un miroir M, formé d'un morceau de glace sans tain, incliné à 45° sur la direction des rayons lumineux. De là, elle se réfléchit à angle droit, et après son passage dans l'objectif d'un corps de lunette qui ramène le faisceau au parallélisme, elle franchit la distance qui sépare les deux stations.



Fig. 159. — Appareil de M. Fizeau pour la mesure directe de la vitesse de la lumière.

Arrivé à Montmartre, le faisceau traverse l'objectif d'une seconde lunette et va se concentrer sur un miroir qui le renvoie, en suivant la même route, sur le premier miroir incliné. Là le faisceau réfléchi, traversant la glace sans tain, peut être examiné par l'observateur muni d'un oculaire. On voit qu'à l'aide de cette disposition, M. Fizeau a pu observer à Suresnes l'image de la lumière placée près de lui, après que ses rayons avaient effectué le double trajet qui sépare Suresnes de Montmartre.

Toute la question était de déterminer le temps que met la lumière à franchir ce double intervalle. Pour y parvenir, M. Fizeau plaçait sur la route du faisceau, un peu en avant du miroir M et au point où les rayons émanés de la lampe vien-

nent former leur foyer, les dents d'une roue R, à laq mécanisme d'horlogerie permettait d'imprimer un mo très-rapide et uniforme.

Toutes les fois que le mouvement de la roue am dent sur la route du faisceau, cette dent fait l'off écran, la lumière est interceptée, tandis qu'elle trave ment le vide qui sépare une dent de la dent suivan comme si l'on abaissait et relevait alternativement devant le passage de la lumière. Supposons qu'au dél rotation, la roue, encore immobile, présente un de au passage de la lumière: l'image réfléchie du point l est vue sans affaiblissement par l'observateur. Si m la roue tourne, mais avec une vitesse telle que dent mette, pour venir prendre la place du vide qu un temps plus long que le temps employé par la pour aller à Montmartre et revenir à Suresnes, qu'arri C'est que le rayon lumineux à son retour trouvera passage libre, par le vide même qu'il a traversé au du départ : le point lumineux sera toujours visible mesure que croîtra la vitesse de rotation, l'intens lumière diminuera, parce que de tous les rayons qui traversent chacun des intervalles, il y en a ur croissant qui, à leur retour, trouveront le passage enfin la vitesse de la roue est telle que le temps em une dent pour venir prendre la place du vide qui l est précisément égal à celui que met la lumière à la double distance des deux stations, il n'est pas rayon lumineux traversant la roue au départ qui le passage fermé au retour; il y aura éclipse continue lumineux, tant que persistera la vitesse dont nous p

Cela suffit, car un compteur adapté à la roue per de connaître le nombre de tours qu'elle fait par se nombre des dents et des intervalles est connu : qu'une dent met à prendre la place d'un vide est d lui-même, et l'on vient de voir qu'il est rigour

égal à celui que met la lumière à parcourir deux fois les 8633 mètres qui séparaient les deux stations. M. Fizeau a trouvé ainsi pour la lumière la vitesse de 315 000 kilomètres par seconde, qui approche beaucoup de celle que donnaient les éclipses des satellites de Jupiter, quand on adoptait la distance du Soleil déduite de l'ancienne parallaxe de cet astre.

Quelque temps après l'expérience de M. Fizeau, en mai et juin 1850, des appareils fondés sur le principe des miroirs



Fig. 160. — Mesure de la vitesse de la lumière par M. Fizeau. — 1. Le point lumineux vu à travers les dents de la roue immobile. — 2. Éclipse partielle du point lumineux. — 3. Éclipse totale.

tournants, employés par Wheatstone à la mesure de la vitesse de l'électricité, ont permis de constater que la lumière se meut avec plus de rapidité dans l'air que dans l'eau et de mesurer le rapport des deux vitesses. MM. Léon Foucault et Fizeau sont parvenus, chacun de leur côté, au même résultat. Enfin en 1862, le premier de ces savants, modifiant son appareil primitif, est allé plus loin encore : il est parvenu à mesurer le temps que la lumière met à parcourir la faible distance de 20 mètres, temps qui équivaut à la cent-cinquante-millionième partie d'une seconde. D'après les dernières expériences de M. Foucault, la vitesse de la lumière dans l'espace est de 298 000 kilomètres par seconde, nombre un peu plus faible que celui obtenu par M. Fizeau, mais qui s'accorde avec celui qu'on déduit des observations d'éclipses des satellites de Jupiter, dans l'hypothèse de la nouvelle parallaxe du Soleil.

CHAPITRE III.

RÉFLEXION DE LA LUMIÈRE.

§ I. LOIS DE LA RÉFLEXION

Bien avant que l'industrie humaine, suscitée par les l
de l'hygiène, du luxe et de la coquetterie, eût songé
les métaux, le verre, et à faire de leurs surfaces brillan
miroirs et des glaces, la nature nous offrait des exem
phénomène auquel les physiciens ont donné le nom (
flexion de la lumière. C'est ainsi que la surface d'u
limpide et tranquille, d'un étang ou d'un lac, renvoie au
l'image fidèle du paysage qui l'entoure, la voûte azu
ciel, les nuages, le soleil ou les étoiles, les arbres, les r
les êtres animés qui se promènent sur les bords ou navi
la surface de la nappe liquide : n'est-ce pas là, sur une
échelle, le modèle que les arts industriels n'ont fait q
pier, et qui aurait pu suffire pour étudier, je ne di
commodément, mais avec fidélité, la route que suit la lu
lorsque, partant des sources lumineuses ou des objets é
elle vient rebondir à la surface des corps. Mais le be
comprendre ne vient jamais qu'après celui d'admirer
jouir, et la découverte des lois qui régissent la réflexio
lumière fut sans doute bien postérieure à l'imitation de
nomènes que nous venons de décrire.

Tant qu'un rayon lumineux se meut dans un milieu
gène, il se propage en ligne droite : on vient de voir co
on peut vérifier expérimentalement ce fait à la surfac



Fig. 161. — Phénomènes de réflexion de la lumière.

Terre, pour les rayons de lumière qui se propagent dans une couche d'air assez limitée pour qu'on puisse la considére comme ayant la même densité dans toutes ses parties. Il est probable que les rayons de lumière, émanés du Soleil ou des autres astres, se propagent aussi en ligne droite dans l'espace interplanétaire, partout du moins où cet espace est vide de matière pondérable.

Mais dès qu'un rayon de lumière arrive à la surface de séparation de deux milieux, du milieu où sa propagation était d'abord rectiligne et d'un autre milieu de densité et de nature différente, il dévie de sa route, en se partageant en deux parties distinctes. Une première partie est renvoyée par la surface dans le premier milieu : on dit alors qu'elle est *réfléchie;* une autre partie pénètre dans le nouveau milieu, où elle est *réfractée,* s'il est de nature à propager la lumière, c'est-à-dire s'il est *transparent* ou *translucide;* elle est absorbée et éteinte, au cas où le nouveau milieu est impropre à transmettre les rayons de lumière, s'il est ce qu'on nomme un corps *opaque.*

Voilà donc deux ordres de phénomènes à étudier, les phénomènes de réflexion et les phénomènes de la réfraction de la lumière. Commençons par les premiers.

La réflexion de la lumière ne s'effectue pas toujours de la même façon à la surface des corps : elle varie en raison de plusieurs circonstances, parmi lesquelles nous considérerons d'abord la nature du corps ou mieux l'état de sa surface. S'agit-il de corps dont la surface est naturellement lisse et polie, comme les liquides en repos, le mercure, ou susceptibles d'acquérir cette qualité par des procédés mécaniques, comme le verre, la plupart des métaux, etc., la réflexion de la lumière à leur surface fera voir, non pas ces corps eux-mêmes, mais les objets éclairés ou lumineux qui se trouvent convenablement situés au devant d'eux. La lumière réfléchie de la sorte produit des images de ces objets, dont les dimensions et la

forme dépendent de celle de la surface réfléchissante, dont la couleur et la lumière sont d'autant mieux conse que le degré de poli est plus parfait. Ce sont des *réflec* ou *miroirs*. Les physiciens disent alors que la lumièı réfléchie régulièrement ou *spéculairement*[1].

Quant à la lumière renvoyée par les corps dont la surfa terne, mate ou rugueuse, elle ne donne pas lieu à des im mais c'est elle qui nous permet de voir les corps d'oï émane, de sorte que chaque point de leur surface éc joue pour les autres objets le rôle d'un point lumineux.

Voyons maintenant quelle marche suit un rayon lum qui se réfléchit en un point d'une surface plane et poli milieu où le rayon est renvoyé étant toujours supposé h gène, on conçoit qu'après sa réflexion il se propagera en droite comme auparavant. Il s'agit de déterminer la dir précise du rayon réfléchi.

Prenons pour surface réfléchissante un bain de me et pour objet lumineux une étoile dont les rayons, qua arrivent d'une distance pour ainsi dire infinie à la su de la Terre, peuvent tous être considérés comme rigour ment parallèles.

Considérons l'un de ces rayons SI (fig. 162), qui tom point I de la surface du bain de mercure. IN étant la ve au même point, ou la normale à la surface réfléchis l'angle SIN est ce qu'on nomme l'*angle d'incidence*. Le SI se réfléchit suivant la direction IR, de sorte qu'en p l'œil dans cette direction, on verra l'image de l'étoile d bain de mercure. L'angle du rayon réfléchi avec la no IN est ce qu'on nomme l'angle de réflexion. Or, il est a vérifier les deux lois suivantes :

1° *Le rayon incident et le rayon réfléchi sont dans le plan avec la normale au point d'incidence;* le plan des

1. Du mot latin *speculum*, miroir.

rayons est donc toujours perpendiculaire à la surface réfléchissante ;

2° *L'angle d'incidence et l'angle de réflexion sont égaux entre eux.*

La vérification de ces deux lois peut se faire au moyen de l'instrument indiqué dans la figure. Cet instrument, formé



Fig. 162. — Étude expérimentale des lois de la réflexion de la lumière.

d'un cercle métallique divisé porté sur un pied, et de deux lunettes fixées au centre du limbe et pouvant tourner dans son plan, est établi dans une position telle que le limbe soit parfaitement vertical. A l'aide de l'une des lunettes, et en faisant tourner convenablement le limbe sur son axe vertical, on vise le bain de mercure de manière à voir l'image de l'étoile réfléchie : à ce moment, le rayon réfléchi coïncide avec l'axe de la lunette, et l'angle N'I'R' est égal à l'angle NIR,

c'est-à-dire à l'angle de réflexion. Si maintenant, à l'a l'autre lunette, on vise directement l'étoile, on constat n'y a point à changer l'instrument de position; le rayon dent S'I' est dans le même plan vertical que le rayon ré Cela démontre déjà la première loi, puisque SI est pa à S'I'. De plus, l'angle S'I'N' est égal rigoureusement à l d'incidence, puisque les côtés de ces angles sont parallè comme en lisant sur le limbe, en degrés, la position de lunettes, on trouve que les arcs compris entre la norm et leurs directions sont égaux entre eux, il en résulte a égalité entre les angles de réflexion et d'incidence, démontre la seconde loi.

Voilà deux lois bien simples. Elles suffisent cepen expliquer les phénomènes les plus complexes, à compte des instruments d'optique les plus variés, tou fois que ces instruments et ces phénomènes sont relati réflexion de la lumière à la surface d'un corps quelc On va bientôt pouvoir en juger.

§ II. IMAGES DANS LES MIROIRS PLANS.

Occupons-nous d'abord des images qui apparaisse surface des miroirs, c'est-à-dire de tous les corps asse pour que la lumière qui tombe à leur surface se réfl régulièrement. Ces images varient de dimensions et de avec la forme et les dimensions de la surface réfléchi mais il nous suffira de donner une idée des effets lu produits par les miroirs plans et par les miroirs sphé cylindriques et coniques.

Tout le monde sait par expérience que les miroi la surface est plane — c'est le cas des glaces, des liquides en repos — donnent des images qui sont la sentation fidèle des objets qu'ils réfléchissent. Les sions, la forme, la couleur se trouvent reproduites ave

titude; seulement l'image est toujours symétrique de l'objet, de sorte que la droite de celui-ci est la gauche de celle-là, et vice versâ. De plus, la distance apparente de l'image au delà du miroir est précisément égale à la distance réelle de l'objet.

La figure 163 rend parfaitement compte de ces circonstances. En effet, tous les faisceaux lumineux que l'extrémité de la flamme d'une bougie envoie sur un miroir plan, divergent dans tous les sens après leur réflexion à la surface du miroir : mais l'égalité des angles d'incidence et de réflexion fait que tous ces faisceaux vont converger derrière le miroir en un



Fig. 163. — Réflexion sur un miroir plan. Forme et position des images.

même point, symétriquement situé par rapport aux rayons lumineux. L'œil qui reçoit l'un de ces faisceaux, sera donc affecté comme si l'objet lumineux était situé au point de convergence, et c'est là qu'il en verra l'image. Quelle que soit donc la position de l'observateur en avant du miroir, la position de l'image ne sera pas changée, bien qu'elle semble occuper des points différents sur le miroir même. L'extrémité inférieure de la bougie formera son image de la même façon, et ainsi de tous les points intermédiaires. D'où l'on voit que l'image d'un objet lumineux quelconque sera formée, point par point, de toutes les images partielles symétriquement situées derrière le miroir, à des distances de sa surface égales aux distances particulières de chacun des points de l'objet.

La figure 164 fait voir comment l'image d'un obj être donnée par un miroir plan, sans pour cela que soit en face même de ce dernier. Il suffit que l'œil so de manière à recev rayons réfléchis, dire dans l'espace di QMM'P. C'est ce qu'c me le *champ du mi* rapport à l'objet.



Fig. 164. — Réflexion sur un miroir plan. Champ du miroir.

Dans les miroirs o ordinaires, il est rar forme et la couleur jets réfléchis ne so un peu altérées. Ce à ce qu'il est diffici tenir un poli parfa surfaces rigoure planes. De la lumièr se mêle alors à la réfléchie spéculairement, et communique à celle-ci loration propre à la substance dont le miroir est fo remarque aussi, dans les miroirs étamés, que les objets une double image. L'une, beaucoup plus faible, se fo surface extérieure du miroir; l'autre, la plus brill celle que donne le miroir proprement dit, c'est-à-di face interne du tain. Les miroirs métalliques n'ont pa convénient, mais ils en ont d'autres plus graves: la qu lumière qu'ils réfléchissent est moins vive et leur s ternit rapidement au contact de l'air.

En disposant deux ou plusieurs miroirs plans d'u variée, on obtient des effets singuliers provenant des r multiples qui se font de l'un à l'autre des miroirs.

Le plus simple de ces effets est celui que fourniss miroirs plans parallèles (fig. 165). Un objet lumineux posé entre les deux miroirs fournit sur chacun d'eux

mière image a_1, a_1, qui, devenant un objet lumineux pour chaque autre miroir, donne lieu à deux nouvelles images plus éloignées que les premières, a_2, a_2. Celles-ci en forment de nouvelles, et ainsi indéfiniment, de sorte que l'œil convenablement placé verra une infinité d'images qui sont à la vérité de plus en plus faibles, à cause des pertes que font subir à la lumière ces réflexions successives. Ces effets s'observent aisément dans une salle contenant deux glaces parallèles et opposées. Les deux séries d'images s'y confondent facilement quand il s'agit



Fig. 165. — Réflexion sur deux miroirs plans parallèles. Images multiples.

d'un point lumineux ; mais si l'on tient à les distinguer, il suffit de regarder un objet dont les faces sont de couleurs ou de formes différentes, comme dans la figure.

Deux miroirs plans formant un angle donnent des images dont le nombre est limité et dépend de la grandeur de l'ouverture. Mais toutes ces images se trouvent placées sur un cercle ayant pour centre un point de la ligne d'intersection des miroirs et pour rayon la distance du point lumineux. Les figures 166 à 169 donnent les images formées par des miroirs inclinés à 90°, à 60° et à 45°. Le premier système donne trois images, le second cinq, le troisième sept.

Ces réflexions multiples ont suggéré la construction de divers instruments, parmi lesquels nous signalerons le *kaléidoscope*, inventé par Brewster.

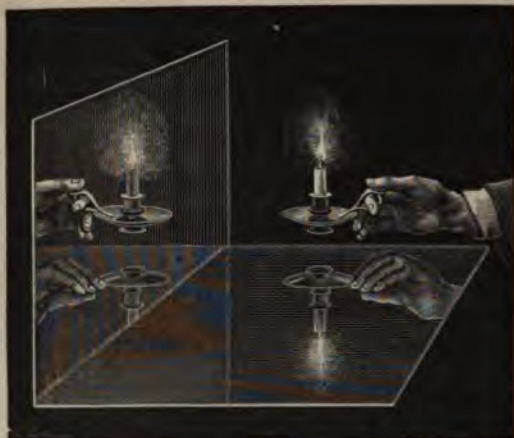


Fig. 166. — Images sur deux glaces inclinées à 90°.

Dans un tube de carton sont disposées trois lames de miroir formant un prisme équilatéral dont la base est fermée par deux lames parallèles, l'une de verre transparent, l'autre de verre



Fig. 167. — Miroirs à angle droit.



Fig. 168. — Images des miroirs à 60°.

dépoli, entre lesquelles on place de petits objets, par exemple des fragments de verre de diverses couleurs. L'œil en regardant par le petit bout de cette espèce de lunette, voit directement ces morceaux de verre, dont les images multiples se forment

par réflexion sur les trois miroirs. Il en résulte des figures régulièrement disposées qu'on fait varier à volonté, en tournant l'instrument sur son axe (fig. 107).



Fig. 169. — Miroirs à 45°.

Dans le kaléidoscope primitif de Brewster, il n'y avait que deux miroirs, et l'on donne ordinairement le nom de *caisse catoptrique* à l'instrument qui en contient trois ou un plus grand nombre.

Le *miroir magique* n'est autre chose qu'une combinaison de deux miroirs plans, inclinés de façon à réfléchir les images d'objets séparés du spectateur par des obstacles. Il sert, sous le nom de *polémoscope*, à observer dans les siéges les mouve-


Fig. 170. — Images symétriques formées dans le kaléidoscope.

ments extérieurs de l'ennemi, tout en restant abrité derrière un parapet (fig. 171).

On voyait il y a quelques années sur le quai du Louvre un pauvre diable qui montrait aux spectateurs ébahis la

façade de l'Institut, au travers d'un énorme pavé. La
magique qui permettait ainsi à la vue de percer le
opaques était composée de deux tubes séparés par la
mais ces deux morceaux étaient réunis par un tul
blement coudé contenant quatre miroirs plans incliné
comme le montre la figure 172. Les rayons lumineu
vaient donc, en suivant cette ligne brisée, tourner l'
et parvenir à l'œil.



Fig. 171. — Polémoscope.

D'autres instruments, d'une plus grande importanc
tifique que ceux dont nous venons de parler, sont é
fondés sur les lois de la réflexion de la lumière à la
des miroirs plans. Mais leur description nous ent
au delà des limites que nous nous sommes impose
ce premier volume, et nous nous bornerons à les i
Ce sont le *sextant*, les *goniomètres*, les *héliostats*. Le
sert à mesurer, sur les navires, les distances angul
deux objets éloignés, d'une étoile au bord de la l
exemple. Les *goniomètres* sont des instruments ay

objet de mesurer les angles que font entre elles les faces des cristaux ; et enfin on donne le nom d'*héliostats* à des appareils



Fig. 172. — Lunette magique.

qui permettent de réfléchir les rayons du Soleil dans une direction invariable, malgré le mouvement diurne qui entraîne le disque de l'astre sur la voûte céleste.

§ III. IMAGES DANS LES MIROIRS SPHÉRIQUES.

Lorsque la lumière, au lieu de se réfléchir sur une surface plane, vient à tomber sur une surface courbe polie, les lois de sa réflexion restent les mêmes pour chaque point de ce miroir, c'est-à-dire que les angles de réflexion et d'incidence sont toujours égaux, de part et d'autre de la perpendiculaire au plan tangent en ce point, ou, comme on dit, de la normale à la surface au point d'incidence : de plus, le rayon incident, le rayon réfléchi et la normale sont dans le même plan. Mais la courbure de la surface modifie la convergence ou la divergence des faisceaux lumineux qui, après la réflexion, viennent tomber dans l'œil : de là des phénomènes particuliers, de là, pour les objets lumineux, formation d'images, dont la distance et la position varient avec la

forme des miroirs, avec leurs dimensions et la distal objets eux-mêmes.

Étudions d'abord ceux de ces phénomènes qui sont réflexion de la lumière sur la surface des miroirs de sphérique.

Une sphère métallique creuse, dans laquelle on co un plan une calotte d'une certaine étendue, donne u sphérique *concave*, si c'est la surface concave qui e et un miroir sphérique *convexe*, si l'on a poli la extérieure. Si le fragment sphérique est un morceau étamé, la couche de tain est extérieure pour un concave, et intérieure pour un miroir convexe. M avons dit déjà pourquoi il est préférable d'employer le en métal poli pour l'observation des phénomènes. parlerons donc pas ici des autres.

Voyons ce qui se passe, lorsqu'on présente un obj neux, la flamme d'une bougie, je suppose, à des dista verses d'un miroir concave dans une chambre obscu ferons en sorte, dans ces expériences, de placer le poi neux sur l'*axe de figure* du miroir, c'est-à-dire sur indéfinie qui joint le centre de la sphère à laquelle tient au point milieu ou au sommet de la calotte sphé

Plaçons d'abord la bougie à une distance du mi grande que le rayon de courbure. Il sera facile, à l' écran recevant les rayons réfléchis, de voir qu'il se f image renversée de l'objet et plus petite que lui, en de l'axe compris entre le centre de la sphère et le rayon (fig. 173). En éloignant le point lumineux d il faut, pour recevoir l'image, rapprocher de plus l'écran du point de l'axe qu'on nomme le foyer du miroir (nous verrons bientôt pourquoi), et l'im jours renversée, diminue de plus en plus. Si l'on r bougie sur ses pas, de sa position actuelle jusque vers on observe que l'image, toujours renversée et touj petite que l'objet, grandit de plus en plus en se ra

du centre. Si la bougie arrive au centre, l'image y arrive en même temps et se confond avec elle, en position et en grandeur. Maintenant continuons à rapprocher la bougie du miroir; nous verrons l'image passer au delà du centre, s'en éloigner de plus en plus en grandissant sans cesse, d'ailleurs toujours renversée (fig. 174). A mesure que l'objet approche du foyer principal, l'image grandit en s'éloignant sur l'axe, devient de



Fig. 173. — Miroir concave. Image renversée, plus petite que l'objet.

plus en plus diffuse, et il n'est bientôt plus possible de la recevoir sur l'écran. Quand la bougie arrive au foyer, l'image est à l'infini; elle s'est complétement évanouie.

Jusqu'ici, l'image de l'objet lumineux a toujours été réelle, c'est-à-dire qu'il existe réellement dans l'air, au point où elle se forme, des faisceaux lumineux dont la réunion reproduit, matériellement pour ainsi dire, la forme et la couleur de l'objet. Aussi avons-nous pu recevoir cette image sur un écran.

18

Il n'en est plus de même, si l'on approche l'objet l
du miroir à une distance moindre que le foyer princip
il n'existe plus d'image réelle; mais l'œil aperçoit
le miroir, comme dans les miroirs plans, une ima
bougie : c'est ce qu'on nomme alors une image virtu
est droite, plus grosse que l'objet, comme le mont
gure 175, et, d'ailleurs, ses dimensions apparentes
diminuant à mesure qu'on approche la bougie du mi



Fig. 174. — Miroir concave. Image renversée, plus grande que l'objet

aurait les dimensions de l'objet même, si celui-ci to
surface réfléchissante.

Tous ces phénomènes peuvent être observés aisémen
des miroirs concaves dont on se sert pour la toilette,
la courbure est calculée de telle sorte qu'à une petite
du miroir, l'observateur, qui est en même temps l'
trouve dans la position que l'expérience précédente
décrire : dans ce cas, il aperçoit sa figure plus ou moins
En s'éloignant à des distances plus ou moins grandes,
se reproduire, dans un ordre inverse, les phénomènes
indiqués.

Voyons maintenant comment les lois de la réflexion de la lumière rendent compte des principales circonstances qui caracté-



Fig. 175. — Miroir concave. Image virtuelle, droite et plus grande que l'objet.

risent les phénomènes dont nous venons de faire la description.

Pour cela, commençons par déterminer la marche d'un rayon lumineux qui tombe en un point de la surface d'un miroir concave, et s'y réfléchit. Deux cas peuvent se présenter : ou le rayon incident passe par le centre de courbure du miroir, ou il passe à une distance quelconque de ce centre. Dans le premier cas, l'incidence est normale, et le rayon réfléchi doit l'être également, c'est-à-dire que le rayon de lumière revient



Fig. 176. — Marche d'un rayon lumineux à la surface d'un miroir concave.

sur ses pas, suit après la réflexion la marche qu
auparavant, et dès lors retourne dans l'espace en pas
seconde fois par le centre. Dans le second cas, soit C
du miroir, SI le rayon incident (fig. 176). Si nous m
rayon de la sphère IC, c'est dans le plan SIC qu'aur
réflexion, puisque ce plan est normal au miroir. De
direction du rayon réfléchi IR sera telle qu'il y ai
entre les deux angles SIC et CIR.

Ces deux règles suffisent pour trouver les positions
de tous les rayons ou faisceaux lumineux incidents et
quelle que soit d'ailleurs leur situation relativement a

Par exemple, la figure 177 nous montre un faisce
mière formé d
parallèles à
principal CA d
concave. Cela
à supposer
rayons éman
point lumine
sur l'axe à
tance infinie
moins assez considérable pour qu'on puisse la c
comme telle. C'est le cas de la lumière qui vient d
des étoiles, ou même, à la surface de la Terre, d'un
fisamment éloigné par rapport au rayon de cour
miroir.



Fig. 177. — Miroir concave. Marche et réflexion des rayons parallèles à l'axe. Foyer principal.

La géométrie et l'observation s'accordent alors à d
que tous les rayons réfléchis viennent couper l'axe pri
un même point, situé à égale distance entre le cent
sommet A du miroir. Leur réunion produit en F, foye
pal, une image du point que l'œil apercevra au mêm
puisque le faisceau divergent qui pénètre dans not
produira le même effet que si un objet lumineux réel
foyer, nous envoyait le même faisceau. Le phénomèn
lisé avec d'autant plus de rigueur que l'ouverture du

plus petite, c'est-à-dire que l'angle du cône ayant son sommet au centre C du miroir et pour base le miroir même, est plus petit. Il ne faut pas que cet angle dépasse 8 à 10 degrés.

Du reste, le miroir étant sphérique, la courbure est la même en chacun de ses points : les rayons réfléchis suivront donc une marche semblable par rapport aux axes secondaires, c'est-à-dire aux lignes droites indéfinies qui joignent chaque point du miroir au centre. Il y a donc une infinité de foyers secondaires sur ces axes, situés, comme le foyer principal, à égale distance entre le centre et le miroir.

Les figures 178 et 179 donnent la marche des rayons lumineux, quand le point lumineux est toujours situé sur l'axe, à une distance du miroir qui n'est pas infinie. Dans cette hypothèse, le faisceau lumineux est formé de rayons qui ne sont plus parallèles et qui tombent sur le miroir en formant avec sa surface différents angles. Trois cas peuvent se présenter alors, selon que le point lumineux est au delà du centre du miroir, entre le centre et le foyer, ou bien entre le foyer et le miroir. Dans tous ces cas, on démontre géométriquement que les rayons réfléchis vont converger en un même point de l'axe principal, où ils se réunissent en faisceau, et que ce point est précisément celui où l'expérience nous a fait voir que se formaient les images.



Fig. 178. — Miroirs concaves. Foyers conjugués.

Par exemple, si le point lumineux est en S (fig. 178) au delà du centre du miroir, un rayon SI se réfléchit en I*s* et coupe l'axe entre le centre et le foyer; tous les autres rayons lumineux viennent, après s'être réfléchis, passer par le même point *s*, où ils forment une image du point S. Ce dernier point vient-il au centre même, les rayons tombent normalement sur le même miroir, et reprennent en

se réfléchissant la route qu'ils suivaient d'abord; le pc mineux et son foyer se confondent au centre du miroi point s'approche encore du miroir, mais à une distance dre que le foyer principal, la réflexion a lieu sur l'axe ε du centre.

Passons maintenant au cas où le point lumineux e entre le centre C et le foyer principal (fig. 178). Il e évident alors qu'un quelconque des rayons incident réfléchira dans la direction IS, et que tous les autre couper l'axe au même point S, où aura lieu leur c gence. L'image d'un point situé entre le centre du mi le foyer principal doit donc se faire sur l'axe au delà du c c'est aussi ce que l'expérience confirme, nous l'avons v haut.

Ce résultat prouve — et l'on pouvait le prévoir — qu faisceau incident partant d'un point de l'axe S donne un faisceau réfléchi qui converge en un autre point de l à son tour un faisceau incident, qui part de ce dernier va converger, après sa réflexion sur le miroir, précisém point d'où émanait le premier faisceau. En un mot, le c parcouru dans un sens par un rayon de lumière qui tor un point du miroir et s'y réfléchit, est parcouru dans u précisément inverse par un rayon de lumière qui ton même point, si la direction d'incidence du second rayo cide avec la direction de réflexion du premier.

Les deux points S et *s* sont donc alternativement des l'un pour l'autre : aussi les nomme-t-on des *foyers* c *gués*. Le foyer conjugué du foyer principal est à l'inf qui est une manière de dire que les faisceaux émanés point sont renvoyés parallèlement à l'axe du miroir.

Quand le point lumineux S est entre le foyer et le cen miroir, un rayon incident SI se réfléchit en IR, c'est s'éloigne de l'axe (fig. 179). Il n'y a donc plus conve des rayons qui composaient le faisceau lumineux, et, pa plus d'image réelle, ce que l'expérience nous avait

déjà. Toutefois, on démontre qu'en prolongeant derrière l'axe les rayons réfléchis, ils s'y coupent en un point *s*, formant ainsi un foyer que, par opposition au foyer réel des cas précédents, on nomme *foyer virtuel*. Et, en effet, un spectateur placé au devant du miroir a toujours la sensation d'une image, parce que les rayons divergents pénètrent dans l'œil de l'observateur en suivant la même marche que s'ils émanaient réellement du point *s*. L'image est alors virtuelle, tout comme l'image vue dans un miroir plan.



Fig. 179. — Miroir concave. Foyer virtuel.

Si l'on a bien compris quelle est la marche d'un faisceau lumineux qui tombe sur la surface d'un miroir concave, et comment, après sa réflexion, il donne lieu à un faisceau réfléchi, convergent ou divergent, selon la position du point lumineux, il sera facile de se rendre compte de la production des images des objets, images tantôt réelles, tantôt virtuelles, tantôt plus grandes, tantôt plus petites que les objets eux-mêmes, enfin tantôt droites, tantôt renversées. On en voit deux exemples dans les figures 180 et 181.

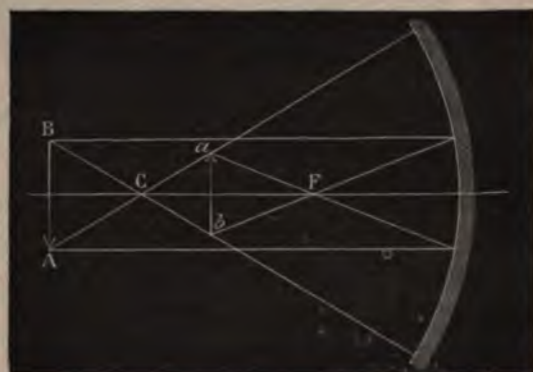


Fig. 180. — Miroir concave. Images réelles et renversées des objets.

Voici quelles sont les règles de la construction géométrique des images, et comment on peut se rendre compte de leurs positions et de leurs dimensions comparées à celles de l'objet.

On cherche d'abord les images de chaque point extrêm
On joint, dans ce but, chacun de ces points au centre
roir : cela donne
gnes AC, BC, q
les axes secon
puis on mène les
parallèles à l'axe
cipal, qui, comme
vu, doivent se r
au foyer F. Les
de rencontre des
réfléchis avec l'a
condaire corresp



Fig. 181. — Miroirs concaves. Image droite et réelle des objets

donnent *a* et *b*, qui sont les foyers des points A et B
à-dire les points où vont se former les extrémités de

Dans les miroirs convexes, les foyers et les images s
jours virtuels, parce que les rayons dont se compose
ceau lumineux incident divergent toujours après leur ré
comme on peut s'en rendre compte si l'on suit la ma
l'un d'entre eux. On voit aussi (fig. 183) comment il
que, dans ces miroirs, l'image est droite, mais t
plus petite que l'objet. Les dimensions sont d'ailleu
tant moindres que la distance de l'objet au miroir
grande. Si l'ouverture du miroir est très-grande, on
une déformation qui est d'autant plus sensible que ce
verture est plus considérable. Tout le monde peut s'as
ce fait en regardant une boule polie semblable à ce
représente la figure 182. On place ordinairement
jardins ces sortes de miroirs sphériques, à la surface
on voit se refléter tout le paysage d'alentour.

On considère encore en optique les miroirs paral
concaves, qui ont la propriété de concentrer les rayon
lèles à l'axe de la parabole au foyer de cette courbe
que soit l'ouverture du miroir, et qui renvoient de m

faisceaux parallèles, toute la lumière d'un objet lumineux



Fig. 182. — Image droite virtuelle dans les miroirs sphériques convexes.

situé au foyer. Les miroirs sphériques ne donnent ce résultat qu'autant qu'ils ont une très-petite ouverture.



Fig. 183. — Mi oir convexe. Image droite et virtuelle.

Quand on examine quelle est, pour un miroir sphérique, la marche des rayons réfléchis provenant d'un point lumineux situé sur l'axe à une distance quelconque, on reconnaît que ces rayons se coupent successivement, d'abord sur l'axe même en ses différents points, puis en dehors de l'axe, de telle sorte que les points

d'intersection forment une surface que les géomètres
ment *caustique*. En tous les points de cette surface, l
mière se trouve accun
plus que partout ailleu
sa concentration maxi
est au foyer du point d
La caustique varie de f
avec la position et la
tance du point lumin
mais il est possible d'en
stater l'existence d'une
expérimentale.



Fig. 184. — Caustique par réflexion.

On emploie dans ce b
écran en carton blanc,
coupé de telle sorte qu'il épouse la forme du miroir en pa
par son centre. Exposé ainsi à la lumière du Soleil ou à
d'une lampe, on aperço
certaines parties de l'é
une lumière plus vive
les contours indiquen
forme de la caustique q
évidemment la même, q
que soit la position de
cran autour du centre.
lame circulaire de m
intérieurement polie,
sur un plan, indiquera
même la forme de
courbe, pour un miroir
lindrique (fig. 184). Cett
périence est due à Brew



Fig. 185. — Caustique par réflexion.

Quand on expose aux rayons du soleil un verre plei
lait, ou mieux, comme le dit J. Herschel, plein d'encr
aperçoit à la surface du liquide une ligne courbe bril
ayant un point de rebroussement au foyer : c'est l'interse

de la caustique du miroir cylindrique concave que forme le verre avec le plan qui limite le liquide à la surface supérieure (fig. 185).

§ IV. IMAGES DANS LES MIROIRS CYLINDRIQUES OU CONIQUES. ANAMORPHOSES.

Les miroirs cylindriques convexes ou concaves produisent des images où les dimensions des objets ne sont pas altérées dans le sens de la longueur du cylindre ou de ses



Fig. 186. — Miroir cylindrique. Anamorphose.

arêtes, mais qui le sont au contraire dans une direction perpendiculaire à la première, c'est-à-dire suivant les circonférences des sections normales. Les rayons réfléchis le long d'une même arête suivent la marche qu'ils prendraient dans un miroir plan; ceux qui se réfléchissent sur la même circonférence suivent le chemin que leur donnerait la réflexion sur un miroir sphérique. Si le cylindre est convexe, l'image sera toujours rétrécie dans sa largeur; s'il est con-

cave, elle sera tantôt rétrécie, tantôt élargie, selon l tance de l'objet au miroir.

Dans les miroirs coniques convexes, les images pro par réflexion sont déformées dans le sens des circonfér et comme le degré de courbure change de la base au so

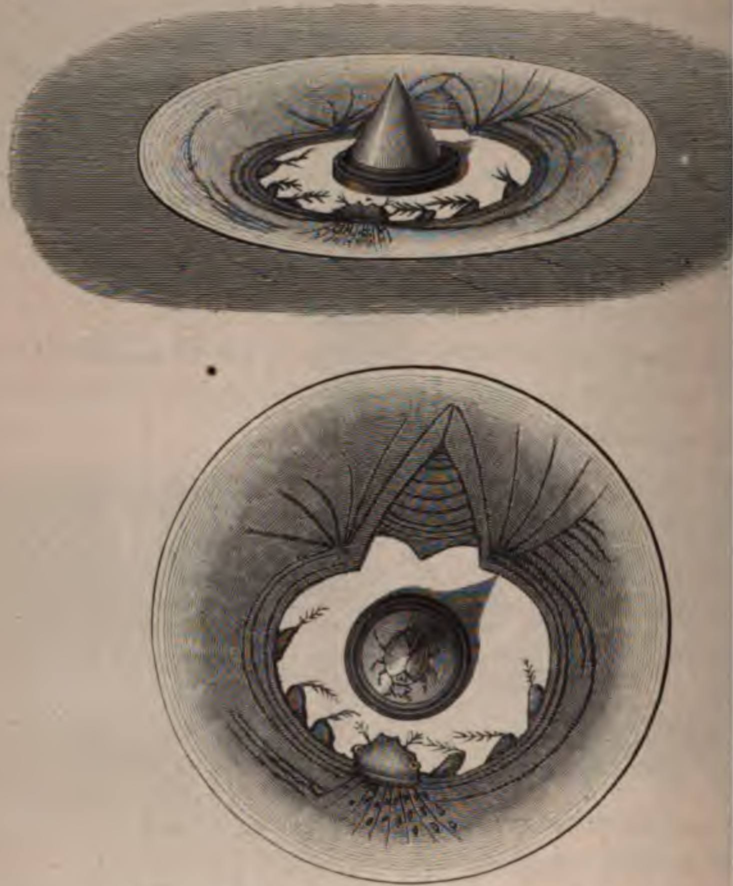


Fig. 187. — Réflexion sur les miroirs coniques. Anamorphoses.

il en résulte dans les dimensions un rétrécissement d' plus considérable qu'on approchera plus du sommet surface conique était concave, la forme de l'image serait p dale, mais pour certaines positions de l'objet, elle serait é

Dans les uns et les autres de ces miroirs, la réflexi rayons lumineux s'opère toujours suivant les lois rigou



Fig. 188. — Les spectres.

que nous avons constatées ; de sorte qu'on a pu construire des dessins bizarres et difformes, et où l'œil n'aperçoit plus aucune figure déterminée, et tels cependant que, réfléchis dans des miroirs cylindriques et coniques, leurs images soient une représentation fidèle d'objets connus. On donne le nom d'*anamorphoses* à ce renversement de formes. On trouve chez les opticiens, des tableaux, dont les lignes et les couleurs ont été combinées pour produire des images régulières de paysages, de personnages, d'animaux, etc., quand on place au centre du tableau le miroir cylindrique ou conique, pour lequel il a été construit. (fig. 186 et 187).

Quand la réflexion de la lumière se fait sur une surface polie, mais transparente, les images se produisent encore, mais elles sont très-affaiblies, une grande partie de la lumière incidente traversant la substance. Voilà pourquoi les miroirs et les glaces ordinaires sont étamées sur leur face postérieure, et alors les images se font comme sur un corps opaque d'un grand poli. Mais les glaces sans tain peuvent être employées et donner des images très-colorées et très-brillantes, quand les objets qu'elles reflètent sont vivement éclairés, et qu'en même temps l'espace qui les entoure, plongé dans une obscurité relative, reçoit peu ou point de lumière diffuse. Tel est le principe des apparitions fantastiques connues au théâtre sous le nom de *spectres* (fig. 188), et qu'on a, récemment encore, utilisées avec succès dans les drames.

La salle où se trouvent les spectateurs est plongée dans l'obscurité, et la scène, séparée de la salle par une glace sans tain, est faiblement éclairée, de sorte que la glace est tout à fait invisible. En donnant à celle-ci une position inclinée (fig. 189), elle réfléchit l'image d'un personnage, image vivement éclairée par une lumière projetée sur ce dernier et placée sous la scène, dans ce que l'on nomme, en style de théâtre, le premier dessous. L'acteur réel que le spectateur voit directement sur la scène et l'image virtuelle, mais animée, du per-

sonnage, peuvent ainsi se mêler, se confondre, de façon
illusion aux spectateurs, et à leur faire croire à l'app
d'un fantôme insaisissable. La nécessité de donner à l

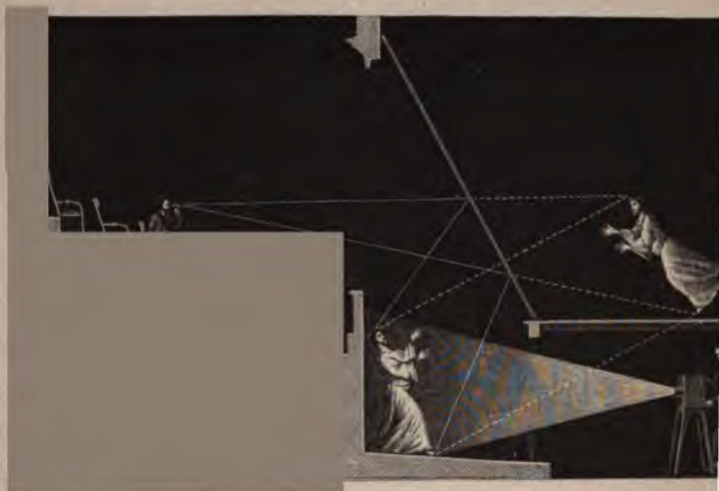


Fig. 189. — Disposition de la glace sans tain et position du fantôme.

une position inclinée fait que le fantôme ne paraît pas
tement en équilibre, et ce défaut est surtout sensible p
spectateurs placés sur les côtés.

§ V. LUMIÈRE IRRÉGULIÈREMENT RÉFLÉCHIE OU LUMIÈRE DIF

Nous n'avons considéré jusqu'ici que la lumière r
régulièrement à la surface des corps polis; et les phén
auxquels donne lieu cette réflexion montrent assez,
nous l'avons déjà dit plus haut, que si le degré de p
parfait, le corps réfléchissant serait invisible pour no
verrait l'image plus ou moins déformée des objets l
qui l'entourent, on ne le verrait pas lui-même. Et si, à
tion des sources de lumière, tous les corps étaient dans
cas, l'œil ne percevrait qu'une multitude indéfinie
des corps lumineux, du Soleil par exemple, sans v
autre chose. Dans une chambre obscure, si l'on fai

les rayons solaires sur un miroir, la surface de ce dernier donne une image éblouissante du Soleil, mais les autres points du corps réfléchissant ne sont légèrement visibles que par la lumière irrégulièrement réfléchie ou diffuse. C'est cette lumière qui permet d'apercevoir le miroir de tous les points de la chambre obscure[1].

La proportion de lumière spéculaire et de lumière diffuse réfléchie par un corps varie avec le poli de sa surface, mais aussi avec la nature du corps, avec sa couleur, et enfin avec l'angle des rayons incidents. Une feuille de papier blanc, mat, réfléchit la lumière dans tous les sens; mais sa blancheur est d'autant plus éclatante qu'elle est exposée plus perpendiculairement à la source de lumière. De même, si l'observateur se place pour examiner la surface de la feuille dans des directions de plus en plus obliques, l'éclat de la lumière diffuse diminue, mais par compensation l'œil reçoit des rayons de plus en plus nombreux réfléchis régulièrement. C'est ainsi qu'en plaçant la flamme d'une bougie très-près de la surface d'une feuille de papier, et en l'observant obliquement dans une direction opposée, on voit une image très-distincte de la flamme réfléchie comme dans un miroir (fig. 190).

Quand on dit que la lumière diffuse est de la lumière réfléchie irrégulièrement, cela ne signifie pas que les rayons dont elle est composée suivent d'autres lois, en se réfléchissant, que la lumière spéculaire. L'irrégularité dont il s'agit provient des aspérités de la surface des corps mats, rugueux, qui reçoivent la lumière sous des incidences variées et la renvoient dans toutes les directions (fig. 191). Quand on regarde très-oblique-

1. Un corps qui n'est pas lumineux par lui-même, est donc seulement visible par la lumière diffuse que sa surface réfléchit de tous côtés. Cependant, on verra plus loin qu'il est un grand nombre de substances ayant la propriété d'émettre une lumière qui leur est propre, quand elles sont exposées aux rayons d'une source lumineuse plus ou moins intense : ce sont les substances dites phosphorescentes. Peut-être tous les corps jouissent-ils de la même propriété à des degrés très-différents, de sorte que leur visibilité serait en partie due à la phosphorescence, en partie à la diffusion de la lumière.

ment une telle surface, les aspérités se masquent les u
autres, et les rayons émanant d'éléments parallèles à la
tion générale de la surface deviennent de plus en plus

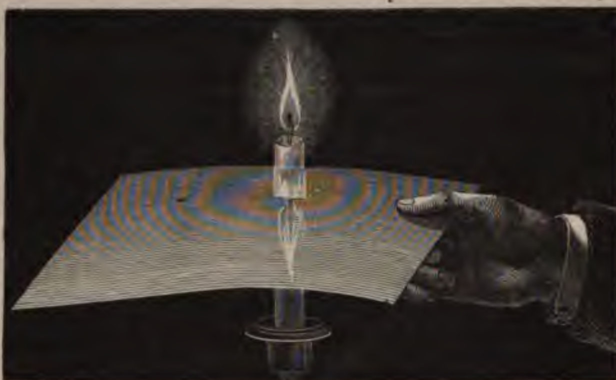


Fig. 190. — Lumière réfléchie très-obliquement.

breux, ce qui explique la proportion croissante de la l
régulièrement réfléchie.

Que la quantité de lumière réfléchie spéculairemen
avec l'état de la surface des corps, cela n'est pas doute



Fig. 191. — Réflexion irrégulière de la lumière à la surface d'un corps non

morceau de verre poli devient un miroir; dépoli, il ne
presque que de la lumière diffuse. Le bois, le marbre, la
une multitude d'autres substances sont dans le même c
le *pouvoir réflecteur*, en donnant ce nom à la prop
réfléchir spéculairement la lumière en plus ou moins
proportion, varie, à degré égal de poli, selon la nature d

stances et selon l'angle d'incidence. Sur cent rayons reçus par l'eau, le verre à glace, le marbre noir poli, le mercure, le métal des miroirs, sous une incidence de 50°, l'eau en réfléchit 72, le verre 54, le marbre 60, le mercure et le métal des miroirs 70. Si l'incidence augmente, le nombre des rayons réfléchis diminue pour les trois premiers corps dans une progression rapide, et n'est plus que de 2 ou 3 au plus, de 60° à 90°; tandis que, sous cette dernière incidence, le mercure réfléchit encore 60 rayons sur 100.

Les corps de couleur sombre ne réfléchissent que peu de lumière. Le noir de fumée ne renvoie pas de lumière diffuse et une faible quantité de lumière spéculaire.

CHAPITRE IV.

RÉFRACTION DE LA LUMIÈRE.

§ I. PHÉNOMÈNES DE RÉFRACTION DE LA LUMIÈRE.

Lorsqu'on plonge un bâton droit dans une eau transparente, il semble que la portion vue à travers le liquide n'est pas la continuation en ligne droite de la partie extérieure. Le



Fig. 192. — Phénomènes de réfraction de la lumière. — Bâton brisé.

bâton paraît brisé à partir de la surface de l'eau, et le bout qui plonge est relevé, comme s'il avait diminué de longueur. Si le bâton est placé verticalement, ou si l'œil reçoit les rayons visuels dans une direction qui le lui fasse voir comme s'il était vertical, le bâton ne semble plus brisé, mais simplement rac-

courci. On peut vérifier aisément ce phénomène en plongeant dans un vase plein d'eau limpide l'extrémité d'un crayon.

Si, avant de remplir le vase du liquide transparent, on en observe, d'une position fixe, le fond par-dessus les bords, et qu'ensuite, sans changer l'œil de place, on verse l'eau progressivement, on voit le fond du vase s'élever peu à peu et apparaître enfin beaucoup plus élevé que la simple perspective ne l'indiquait d'abord. Pour rendre l'expérience plus sensible, on n'a qu'à mettre une pièce de monnaie en un endroit du fond que les bords du vase cachent entièrement. A mesure que le niveau de l'eau monte, l'objet, redevenu visible,



Fig. 193. — Réfraction de la lumière. Élévation apparente du fond des vases.

semble monter avec lui et prendre la position apparente qu'indique la figure 193.

Tout le monde a pu remarquer aussi que les objets vus par transparence à travers une carafe pleine d'eau apparaissent grossis, déformés, déplacés de leur position réelle. En suivant les mouvements des poissons que l'on élève dans des vases en verre de forme sphérique, on est étonné de voir ces animaux, tantôt disparaître, tantôt grossir démesurément, tantôt diminuer peu à peu jusqu'à n'avoir plus pour l'œil que leurs dimensions réelles.

Tous ces phénomènes sont dus à ce que les physiciens nomment *réfraction de la lumière*, c'est-à-dire à la déviation que les rayons lumineux éprouvent en passant d'un milieu dans un autre, par exemple de l'air dans l'eau.

Quand la lumière part d'un objet lumineux ou éclairé, elle

se meut en ligne droite — nous l'avons vu — pourvu qu milieu qu'elle traverse soit homogène. Ainsi, le faisceau qu voie vers notre œil le bout du bâton plongé dans l'eau, est tiligne, tant que son voyage s'effectue dans l'eau, milieu mogène. Le chemin suivi par le même faisceau, pour arr de la surface de l'eau à notre œil, est pareillement rectili parce qu'il s'effectue dans l'air, autre milieu homogène. le second faisceau n'est pas le prolongement de l'autre, chemin total suivi par les rayons lumineux forme une l brisée, dont l'angle a son sommet au point commun d'i dence, à la surface de séparation des deux milieux.

Des phénomènes semblables ont lieu dans toute espèce c quides, dans les solides transparents comme le verre, et, pa lement, dans tous les gaz; seulement, comme nous le ver plus loin, la déviation varie selon les différents milieux.

Il y a longtemps qu'on a constaté les principaux effet la réfraction de la lumière, et l'apparence des objets à tra une eau limpide a sans doute été observée de toute antiq Les anciens astronomes, Ptolémée par exemple, connaiss les effets de la réfraction atmosphérique ou la dévi que subissent les rayons lumineux des astres en passan vide des espaces planétaires dans les couches de plu plus denses de notre atmosphère. Mais ce n'est qu'au c mencement du dix-septième siècle qu'un jeune géomètre landais, Willebrod Snell, découvrit la cause de cette dévie et les lois que suit un rayon lumineux, lorsqu'il passe milieu homogène dans un autre. Ces lois portent quelqu le nom de Descartes, parce que ce grand homme les déco à son tour, ou du moins les exprima sous une forme qu demeurée dans la science.

Voyons quelles sont ces lois.

§ II. LOIS DE LA RÉFRACTION SIMPLE.

Un rayon ou faisceau lumineux se propage d'un milieu homogène, dans un autre milieu également homogène, mais ayant une densité différente de celle du premier. Il arrive en un point de leur surface de séparation, en faisant avec la ligne perpendiculaire ou normale à cette surface, un certain angle qu'on nomme *angle d'incidence.* En pénétrant dans le second milieu, il continue sa route en ligne droite, mais en suivant une direction plus ou moins éloignée de la première, en faisant avec la normale un angle, qu'on nomme *angle de réfraction*, et qui, en général, n'est pas égal à l'angle d'incidence. Dans quel rapport sont ces deux angles; quelle est la direction du faisceau ou rayon réfracté, par rapport à celle du faisceau ou rayon incident? C'est à ces questions que répondent les énoncés des lois de la réfraction simple.

Voici comment on peut démontrer expérimentalement ces lois :

On se sert, pour cela, de l'appareil que représente la figure 194. C'est, comme on voit, un cercle gradué, au centre duquel est fixé un vase ayant la forme d'un cylindre en verre, qu'on remplit à moitié d'eau ou de tout autre liquide : si l'on place l'appareil de façon à maintenir le cercle dans un plan vertical, la surface du liquide en repos, qui est horizontale, se trouvera perpendiculaire au diamètre vertical du cercle, diamètre qui coïncide avec le zéro des divisions du limbe.

On fait arriver alors le rayon incident, venant du Soleil par exemple, au point I d'un miroir qu'on incline de manière à réfléchir le rayon dans la direction du centre O du cercle à travers le petit trou d'un diaphragme fixé, ainsi que le miroir, à une alidade mobile autour du centre. Le rayon pénètre alors dans le liquide, et en sort par le contour du cylindre de verre. Voici maintenant ce que l'on constate :

Si le rayon lumineux incident est entré dans le liqui
lon la direction de la verticale, il sort sans déviation, c
on peut s'en assurer en le recevant au centre d'un
diaphragme fixé à une seconde alidade mobile. Ainsi pr
rement, il n'y a pas de réfraction pour une incidence nor

Fait-on varier l'angle d'incidence, on trouve que l'an
réfraction, ici toujours plus petit que le premier, varie;



Fig. 194. — Démonstration expérimentale des lois de la réfraction.

dans tous les cas, dans toutes les positions de l'alidade p
quelle arrive le rayon incident, le rayon réfracté, ap
sortie du cylindre — sortie qui se fait sans déviation
velle — coïncide toujours en direction avec l'axe de
conde alidade. Ce résultat démontre la seconde loi dont
l'énoncé :

Quand un rayon lumineux passe d'un milieu da
autre, il se brise, et le rayon incident et le rayon ré
restent dans un même plan perpendiculaire ou norma
surface de séparation des milieux.

Il s'agit maintenant de trouver la loi de variation des angles de réfraction et d'incidence. A l'aide de la première alidade, munie d'une pointe à son extrémité opposée, on a la direction du rayon incident, et l'on peut mesurer la ligne *oa* sur une règle divisée horizontale, susceptible de se mouvoir parallèlement à elle-même. Cette ligne, ou mieux son rapport à la longueur du rayon *a*O, est ce que les géomètres nomment le *sinus de l'angle d'incidence.* La seconde alidade, munie également d'un diaphragme percé d'un trou, reçoit, après son passage à travers l'eau, le rayon lumineux réfracté, et l'on mesure *ob* sur la règle, ce qui donne le *sinus de l'angle de réfraction.* Rappelons qu'en sortant de l'eau pour repasser dans l'air, le rayon lumineux n'a pas à subir de réfraction nouvelle, puisqu'il sort par une incidence normale à la surface du vase cylindrique.

Eh bien, supposons qu'une première observation ait donné deux sinus tels, qu'en divisant celui d'incidence par celui de réfraction, le quotient ou rapport soit le nombre 1, 335. Répétons l'expérience une, deux, trois... fois, en changeant à chaque fois la direction du rayon incident. Dans chaque expérience nouvelle, le rapport du sinus d'incidence et du sinus de réfraction continuera à être 1, 335. Et il en sera de même, tant que les deux milieux seront toujours l'air et l'eau. Mais ce nombre, qu'on nomme *indice de réfraction*, varie lorsque l'un des milieux change, ou quand les deux milieux changent à la fois : ainsi, de l'air au verre, l'indice de réfraction n'est plus égal à celui de l'air à l'eau. Aussi convient-on de calculer les indices de tous les corps transparents en supposant que la lumière passe du vide dans chacun d'eux. Alors on obtient les indices *absolus*. Ordinairement, la réfraction est d'autant plus forte que la densité du deuxième milieu est elle-même plus considérable, bien qu'il y ait quelques exceptions. Ainsi, le plus souvent, la réfringence du milieu croît avec sa densité.

La troisième loi de la réfraction de la lumière peut donc s'énoncer ainsi :

Pour deux milieux déterminés, le rapport des si[n] angles d'incidence et de réfraction est un nombre co[n] quelle que soit d'ailleurs l'incidence.

Les lois que nous venons d'étudier indiquent quel [c] suit la lumière, quand le faisceau lumineux vient à [...] d'un milieu dans un autre. Mais ce chemin, comme le [...] vent à la fois le raisonnement et l'expérience, reste[...] même si la lumière passait du second milieu dans le pr[...] Alors le rayon incident deviendrait le rayon réfracté e[...]

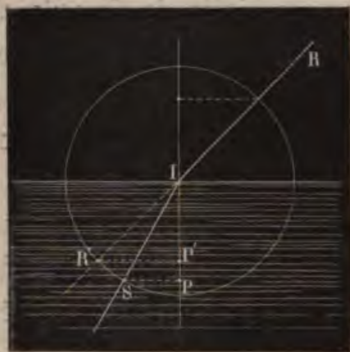


Fig. 195. — Loi du sinus.

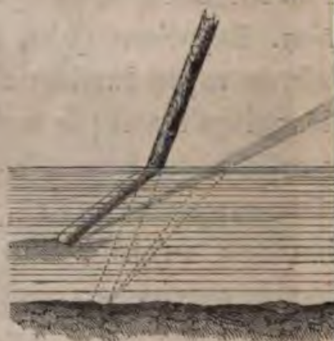


Fig. 196. — Explication du bâton [...]

proquement. Par exemple, si le point lumineux est dans [...] en S, le rayon qui tombe au point I de la surface s'écar[t] la perpendiculaire suivant la direction IR ; la route SI [...] la même, en sens inverse, que si le rayon incident eût [...] de sorte que les angles d'incidence et de réfraction aur[...] sinus inverses, mais dont le rapport sera toujours const[...]

Ces lois permettent de rendre compte des phéno[...] que nous avons décrits au début de ce chapitre. L'œil q[u] mine l'extrémité d'un bâton plongé dans l'eau, le voit par [...] ceau lumineux que cette extrémité envoie à la surface, [...] ceau qui se réfracte et dont les divers rayons, d'autan[t] déviés que leur incidence est plus oblique, pénètren[t] l'œil en divergeant (fig. 196). Le phénomène est d[...]

même que si le point lumineux était au point de convergence de ces rayons, et l'œil voit en effet l'extrémité du bâton en ce point. Le même effet se produit pour tous les points intermédiaires, et le bâton paraît brisé.

La même explication rend compte de l'élévation du fond



Fig. 197. — Élévation apparente du fond des vases; explication.

d'un vase plein de liquide. Lors même qu'on regarde le fond dans une direction perpendiculaire (fig. 197), l'effet se produit, parce que l'œil ne reçoit pas un rayon unique, mais un faisceau dont les rayons divergent plus en passant dans l'air, à cause de la réfraction, que dans le liquide. Le point paraît donc remonté vers la surface, de O en O′.

§ III. PHÉNOMÈNES DE RÉFLEXION TOTALE.

Il résulte des lois de la réfraction un phénomène singulier, que l'expérience vérifie, et qui a reçu le nom de *réflexion totale*. Voici en quoi consiste ce phénomène.

Considérons, par exemple, un point lumineux pl
l'eau, au fond d'un vase. Ce point envoie des rayon
mière dans toutes les directions possibles à la surface
ration de l'air et de l'eau. Or, tous ces rayons émerg
On va voir que cela ne peut être, et qu'il y a un certa
variable avec la nature du milieu, au delà duquel le r
mineux ne peut pénétrer dans le milieu le moins ré
En effet, puisqu'ici l'angle de réfraction est plus gr
l'angle d'incidence, il arrivera un moment où, le
angle étant devenu droit, l'angle d'incidence OIN' ne
encore. Le rayon n'émerge donc plus; il rase la surfa

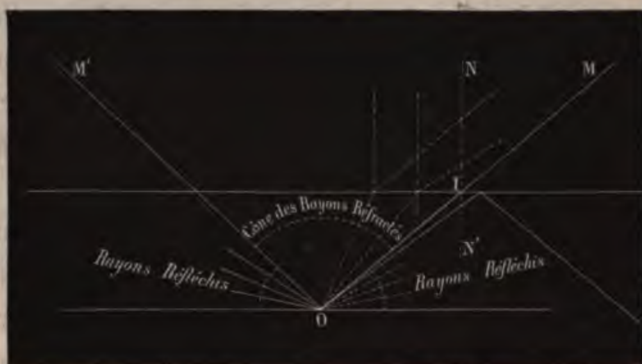


Fig. 198. — Réflexion totale. Angle limite.

zontale du liquide. Au delà, l'angle d'incidence crois
jours, l'angle de réfraction devrait être plus grand qu'
droit. Dans ce cas, le rayon retourne au sein du liq
il se réfléchit, d'après les lois connues, à la surface in
séparation. Comme, dans les incidences moindres, l'ém
n'est pas complète, et qu'il y a une réflexion parti
rayons, on dit, lorsque cette émergence est nulle, q
réflexion totale. Tous les rayons lumineux qui, de
couper la surface de séparation des deux milieux
sent ainsi en deux parties; la première, contena
qui émergent, forme le *cône des rayons réfractés*
la seconde se compose de tous les rayons qui ne

émerger et sont réfléchis à l'intérieur du milieu le plus réfringent.

On nomme *angle limite* celui au delà duquel commence la réflexion totale. Cet angle est de 48 degrés et demi environ, pour les rayons qui se réfractent de l'eau dans l'air; il est seulement de 41 degrés du verre dans l'air.

Une expérience fort simple permet de constater le phénomène de la réflexion totale, et fait voir en même temps que la réflexion ainsi obtenue surpasse en éclat toutes celles qu'on obtiendrait directement, par exemple à la surface du mercure ou des métaux polis. On remplit d'eau un verre à boire que l'on tient de façon que la surface du liquide soit au-dessus de l'œil (fig. 199). En regardant obliquement la partie inférieure de cette surface, elle paraît plus brillante que l'argent poli et semble avoir un éclat métallique. La partie inférieure d'un objet qui plonge dans l'eau se voit réfléchie comme par un miroir.

Un plongeur, immergé dans une eau parfaitement tranquille, et portant les yeux vers la surface du liquide, sera témoin de phénomènes singuliers. La réfraction lui fera voir, dans un cercle d'environ 97 degrés de diamètre, tous les objets situés au-dessus de l'horizon d'autant plus déformés et rétrécis, surtout dans le sens de la hauteur, qu'ils seront plus voisins de l'horizon sensible. « Au delà de cette limite, le fond de l'eau et les objets submergés seront réfléchis et se peindront à la vue aussi vivement que par la vision directe. De plus, l'espace circulaire dont nous venons de parler paraîtra entouré d'un arc-en-ciel perpétuel, coloré faiblement, mais avec beaucoup de délicatesse. » (*J. Herschel.*)

C'est aussi le phénomène de la réflexion totale qui explique comment il se fait qu'un prisme de verre isocèle et rectangle, adapté à l'ouverture d'un volet d'une chambre obscure, intercepte toute lumière venue du dehors et laisse la chambre dans la plus complète obscurité. Les rayons qui pénètrent dans le prisme par sa face perpendiculaire (fig. 200) y pénè-

trent sans réfraction, mais arrivés à la surface obliqu
d'incidence est de 45 degrés, c'est-à-dire supérieur
limite : la réflexion totale a lieu, et il n'y a pas d'ém
Les rayons qui peuvent entrer seraient dus à des in
obliques, que le tube où est logé le prisme intercept



Fig. 199. — Phénomène de réflexion totale.

Le phénomène de la réfraction a lieu toutes les f
rayon de lumière passe d'un milieu dans un autre, q
nature et sa densité diffère du premier. Il est don
que les rayons lumineux émanés des astres, du S
étoiles, de la Lune, qui, après avoir cheminé dans le

célestes, ont à traverser les couches de l'atmosphère pour arriver jusqu'à notre œil, subissent une réfraction. Dès lors, nous ne voyons pas les astres dans la direction des lignes droites qui joignent réellement chacun d'eux à la position que nous occupons à la surface de la Terre. Il n'y a d'exception que pour ceux qui se trouvent au zénith de chaque horizon.



Fig. 200. — Phénomène de réflexion totale, à l'ouverture d'une chambre obscure.

La réfraction atmosphérique dépend de la hauteur angulaire à laquelle l'astre observé se trouve au-dessus de l'horizon; elle dépend pareillement de la loi suivant laquelle décroissent les densités des couches d'air dont se compose l'atmosphère. Comme on n'a que des données fort incertaines sur cette loi, il eût été très-difficile de mesurer directement les déviations qui correspondent aux diverses hauteurs des astres. Heureusement l'astronomie est venue au secours de la physique. La distance angulaire d'une étoile au pôle céleste restant invariable, quelle que soit la hauteur à laquelle le mouvement diurne l'amène au-dessus de l'horizon, les différences que l'observation constate entre les distances obtenues depuis la plus grande hauteur jusqu'à l'horizon même, ne peuvent provenir que de la réfraction atmosphérique. De là, la possibilité de construire une table des réfractions astronomiques, de l'horizon jusqu'au zénith.

A l'horizon la réfraction s'élève à près de 34'. Comme le diamètre du Soleil et celui de la Lune ont une valeur moindre, il en résulte qu'en mer, où aucun objet ne masque la limite de l'horizon, le disque du Soleil apparaît déjà tout entier au-dessus de la nappe liquide. avant que le sommet de l'astre ait émergé au-dessus de cette limite. La journée se trouve ainsi

allongée le matin par la réfraction, et on comprend qu'il de même le soir, au coucher du Soleil. Le même phén rend compte de cette particularité curieuse observée plusieurs éclipses de Lune, que ce dernier astre était vu é alors que le Soleil était encore visible à l'horizon occi

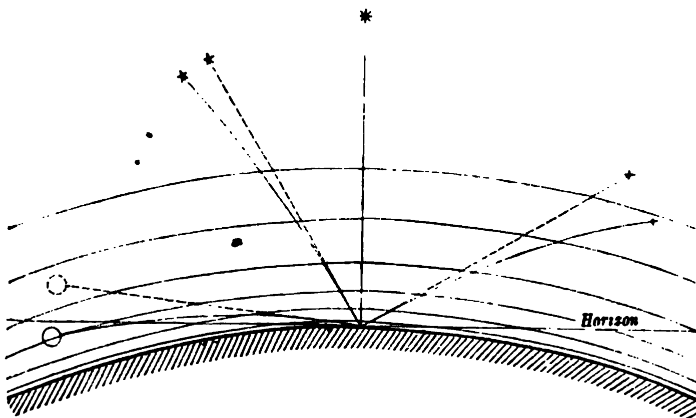


Fig. 201. — Réfraction atmosphérique. Ses effets sur le lever et sur le coucher de

Enfin, c'est aussi la réfraction atmosphérique qui, d éclipses totales de Lune, permettant à une certaine q de rayons solaires d'atteindre notre satellite, empêc son disque soit complétement invisible. Ce disque p alors une coloration rougeâtre très-marquée, sembl celle dont l'atmosphère est teinte au moment du couc Soleil. (Voyez la planche XIII de notre ouvrage LE CIEL

§ IV. RÉFRACTION DANS LES LAMES A FACES PARALLÈLES.

Quand on examine un point lumineux à travers une l substance transparente, de verre je suppose, dont le faces planes sont parallèles, si l'œil et le point sont s même perpendiculaire à la lame, le point lumineux dans la direction même où il serait aperçu sans aucune position de milieu réfringent. Cela tient à ce qu'il n'y a réfraction pour les rayons normaux.

Mais il n'en est pas de même pour une incidence oblique. En ce cas, le point lumineux est dévié. Cette déviation est rendue sensible par une expérience d'une grande simplicité. Prenez une lame de verre, posez-la sur un papier où se trouvent tracées des lignes droites et courbes, de manière que la lame ne recouvre qu'une partie des lignes. En regardant perpendiculairement, vous trouverez que les lignes vues par transparence sont la continuation des lignes vues directement. En regardant obliquement, vous remarquerez une



Fig. 202. — Déviation due à la réfraction à travers des lames à faces parallèles.

déviation, une solution de continuité d'autant plus marquée que l'incidence des rayons lumineux sera plus oblique. Cette déviation est due à la réfraction, et elle est aussi d'autant plus forte que l'épaisseur de la lame est plus considérable.

Il résulte évidemment de là que les lames transparentes, les vitres, les glaces dont on recouvre les gravures pour les encadrer déforment les images; mais ce défaut est presque insensible, peu de personnes le remarquent.

Du reste, quand nous parlons de déviation, c'est déplacement latéral qu'il serait préférable de dire, car le rayon lumineux qui traverse une ou plusieurs lames à faces parallèles conserve, après son émergence, une direction parallèle à celle du rayon incident, comme le montre d'une manière assez évidente la figure 203. Cette propriété est une conséquence du

parallélisme des normales aux points d'incidence et d'émergence, ainsi que des lois de la réfraction, pour deux milieux dont la réfringence est donnée. L'expérience montre que les



Fig. 203. — Marche d'un rayon lumineux à travers une lame à faces parallèles.



Fig. 204. — Marche d'un faisceau lumineux.

rayons sont toujours parallèles, s'ils sortent après avoir traversé un nombre quelconque de lames, alors même que ces lames ne seraient pas formées de substances identiques, et



Fig. 205. — Images multiples produites par la réfraction dans les lames à faces parallèles.



Fig. 206. — Marche des rayons qui donnent lieu aux images multiples des lames à faces parallèles.

qu'elles ne seraient point situées parallèlement; et la théorie permettait de prévoir ce résultat. Enfin, il est encore le même, quand les lames de substances différentes sont contiguës. Le

déplacement latéral dépend, dans tous les cas, de la réfringence des substances et de l'épaisseur des lames.

Si l'on met une bougie en face d'un miroir étamé, et qu'on se place obliquement pour en examiner l'image, on apercevra, en avant de l'image brillante formée sur la face intérieure étamée, une image plus faible provenant de la face extérieure du verre et, en outre, une série d'images encore moins brillantes situées en arrière de la première. Ces dernières images sont dues aux rayons qui, après s'être réfractés une première fois dans l'épaisseur de la lame, se trouvent partiellement réfléchis par la face étamée et par la face intérieure de la surface externe du miroir. La figure 206, qui donne la marche successive de ces rayons, rend compte du phénomène, aisé à constater, que nous venons de décrire.

§ IV. RÉFRACTION DANS LES PRISMES.

Examinons maintenant les phénomènes qui dépendent de la réfraction de la lumière, quand elle traverse un milieu



Fig. 207. — Forme géométrique du prisme

réfringent, dont les faces planes ne sont pas parallèles, c'est-à-dire dans les *prismes*.

La figure 207 montre en perspective et en coupe la forme

géométrique du *prisme* tel qu'il est employé en opti
Pour faire les expériences, on monte le prisme sur un
de manière qu'on puisse le tourner ou l'incliner à vo
(fig. 210).

L'effet d'un prisme sur un rayon lumineux, qui pé
par une de ses faces, traverse le prisme et émerge par l'
face, est de dévier le rayon du côté de la base. Il suffit d'examiner la figure 209 qui donne la marche des rayons incidents et réfractés pour mettre ce résultat en évi-



Fig. 208. — Prisme monté sur pied.



Fig. 209. — Déviation des rayons lu
par les prismes.

dence : le rayon incident SI, après une première réfr
parcourt dans le prisme le chemin IE, se réfracte de
veau en sortant du prisme, et enfin émerge dans la
tion ER. C'est ce que l'observation confirme ; car si l'o
mine un objet à l'aide du prisme, en plaçant son arêt
une position horizontale, on voit que l'image est r

si la base est inférieure; et qu'elle est abaissée, si la base occupe la position inverse.

L'œil, en effet, voit le point lumineux dans la direction des rayons qui pénètrent à son intérieur et à l'endroit où ces rayons convergent. Si, comme nous venons de le voir, le faisceau diverge en se rapprochant de la base du prisme, leur



Fig. 210. — Images des objets vus à travers les prismes.

convergence aura lieu du côté du sommet, et l'œil verra le point relevé ou abaissé suivant que la base est au-dessous ou au-dessus de l'arête (fig. 210).

La déviation est d'autant plus grande que l'angle du prisme est plus considérable, quand l'angle d'incidence des rayons reste le même. Pour un même prisme, à mesure que le rayon incident se rapproche de la normale, l'angle d'émergence croît, et il y a une direction pour laquelle on atteint l'angle

limite de la réflexion totale. Alors il n'y a plus d'émerge
Cela dépend du reste de la substance qui compose le pri
Dans le cas d'un prisme de verre de 45 degrés, tout r
lumineux qui tombe au-dessous de la normale du côté
base ne peut émerger; mais ceux qui tombent du côt
sommet donnent des rayons émergents.

Nous nous occuperons plus loin des phénomènes de co
tion qu'on observe dans les faisceaux lumineux déviés pe
prismes. Étudions auparavant la marche de la lumière, q
elle traverse des milieux transparents terminés par des
faces courbes.

§ V. RÉFRACTION DANS LES LENTILLES.

Si l'on taille dans un morceau de verre, ou dans une
substance transparente, un disque dont les deux faces s
bombées et aient la forme rigoureuse de deux portio
sphère, on a ce que l'on nomme une *lentille*. Le nom es
comme on le voit, de la ressemblance qui existe ent
forme d'une telle masse avec celle du légume connu de t
monde. Il y a, nous allons bientôt le voir, diverses sort
lentilles; mais c'est celle que nous venons de décrire qui f
l'instrument appelé *loupe*, employé dans une foule d'u
par toutes les personnes, naturalistes, graveurs, horlogers
qui ont besoin de grossir, pour les voir avec plus de d
les parties les plus petites des objets.

Il paraît certain que les lentilles de verre et leurs
grossissants sont connus depuis fort longtemps. On a t
des objets analogues et dont l'emploi optique ne semb
douteux, dans les fouilles de Ninive et dans celles de P
et d'Herculanum. Les besicles sont en usage, en Euro
moins depuis le commencement du quatorzième siècle.
ce n'est guère que depuis trois cents ans que la connai
des lois rigoureuses de la réfraction a permis aux optici

construire et de combiner des verres, de façon à obtenir avec précision tel ou tel effet voulu.

Les physiciens ont donné par extension le nom de lentilles à toutes les masses transparentes terminées au moins d'un côté par des surfaces courbes, sphériques, cylindriques, etc., alors même que ces surfaces sont concaves au lieu d'être convexes comme dans la loupe. Le plus souvent, et à moins qu'on ne dise expressément le contraire, les surfaces des lentilles sont toutes deux sphériques; ou bien, l'une étant plane, l'autre est sphérique. C'est ce que nous supposerons toujours dans



Fig. 211. — Loupes ou lentille à faces convexes.

le cours de cet ouvrage. Mais toutes se rangent très-simplement en deux classes, selon la marche que suit la lumière qui les traverse. Les unes, comme la loupe, sont *convergentes*, c'est-à-dire que les rayons lumineux se trouvent, après leur passage, plus rapprochés qu'auparavant. Les autres sont *divergentes,* parce que, au contraire, les rayons s'éloignent les uns des autres ou divergent, soit en entrant, soit en sortant du milieu réfringent dont elles sont formées. Il y a, du reste, un moyen fort simple de les distinguer les unes des autres à première vue : les lentilles convergentes sont toutes plus épaisses au centre, de sorte que leurs bords sont tranchants. Les lentilles divergentes sont plus minces au centre qu'aux bords.

Le type de la lentille convergente, nous venons de l
est la loupe ou lentille *bi-convexe*, dont les deux faces
nairement de même courbure, sont bombées;

Puis, vient la lentille *plan-convexe*, dont une face est
et l'autre bombée. Enfin, la troisième lentille converge
le *ménisque convergent*, dont une face est concave et l
d'une courbure plus prononcée, est bombée ou conve
figure 212 donne la forme de chacune de ces lentill
par sa tranche, ou mieux par son épaisseur, en sup
qu'elle soit coupée dans le sens d'un de ses diamètres.

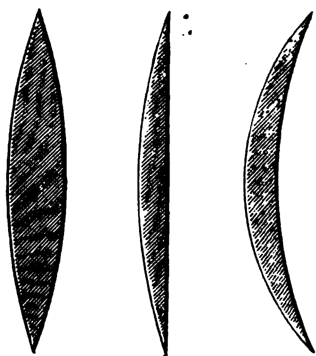


Fig. 212. — Lentilles convergentes. — Lentille bi-convexe ; lentille plan-convexe ; ménisque convergent.

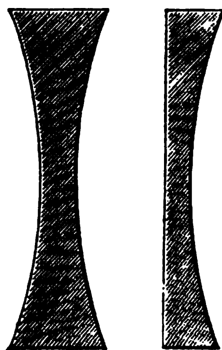


Fig. 213. — Lentilles divergentes. bi-concave ; lentille plan-conc nisque divergent.

Le type de la lentille divergente est la lentille *bi-co*
formée de deux faces concaves. Puis, ce sont ensuite la
plan-concave dont une face est concave et l'autre pl
le *ménisque divergent*, dont les deux faces sont l'un
vexe et l'autre concave, cette dernière ayant la plu
courbure.

Pour ne pas être obligé d'y revenir, disons une fo
toutes que l'*axe principal* d'une lentille est la ligne dr
définie qui passe par les centres des sphères aux
appartiennent leurs surfaces, ou, si l'une de celles-ci est
la ligne qui, du centre de la surface courbe, tombe pe
culairement sur la surface plane. Dans les lentilles c

gentes, l'axe traverse le verre dans sa plus grande épaisseur; c'est le contraire dans les lentilles divergentes.

Avant toute expérience, les lois connues de la réfraction nous montrent qu'un rayon de lumière qui se propage dans la direction de l'axe traversera la lentille sans déviation et continuera sa route suivant cet axe même, absolument comme s'il traversait normalement une lame à faces parallèles.

Il y a d'autres lignes qui jouissent d'une propriété analogue et qu'on nomme pour cela des *axes secondaires*. Ce sont celles qui coupent l'axe au milieu de l'épaisseur maximum ou minimum : IOI' (fig. 214) est un axe secondaire dans chacune des lentilles représentées. Toutes les fois qu'un rayon lumineux NI, suit, après son entrée, la direction d'une de ces lignes, il émerge dans une direction N' I' parallèle à celle du rayon incident, et comme les épaisseurs des lentilles sont ordinairement très-petites, on peut dire que le rayon incident et le rayon émergé cheminent dans la direction même de l'axe secondaire. On nomme *centre optique* de la lentille, le point O où concourent l'axe principal et les axes secondaires. Si les deux faces n'ont pas la même courbure, le *centre optique* est toujours à l'intérieur, mais il n'est plus à égale distance des deux faces. Pour les lentilles *plan-convexes* et *plan-concaves*, le centre optique est sur la surface courbe; dans les ménisques convergents et divergents, il est à l'extérieur.

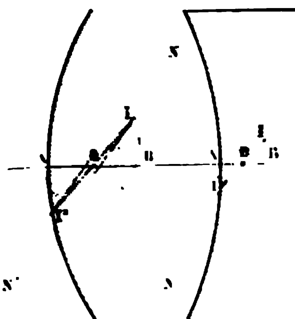


Fig. 214. — Axes secondaires des lentilles. Centre optique.

Ces définitions bien comprises, voyons quelle est la marche de la lumière à travers une lentille bi-convexe.

Plaçons-la en face du Soleil, de manière que son axe principal soit parallèle aux rayons de cet astre. Puis, recevons la lumière qui émerge de la lentille, sur un écran placé de l'autre

côté et à une certaine distance. Nous apercevrons sur l
un cercle lumineux, dont la netteté et les dimensions d
dront de la distance où l'écran est de la lentille. En élo
ou en rapprochant l'écran, nous finirons par trouver u
sition telle que cet éclat sera le plus vif possible, la nett
l'image circulaire la plus grande et ses dimensions le
petites : ce serait un point mathématique, si la source
mière était elle-même un point. Ce point où viennen
verger, après leur réfraction, les rayons parallèles à
principal se nomme le *foyer principal* de la lentille. I
tance FA du foyer à la lentille, qu'on nomme la *di*

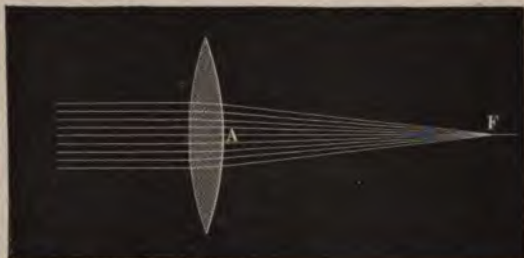


Fig. 215. — Marche des rayons parallèles à l'axe. Foyer principal.

focale principale, dépend à la fois de la substance
compose et de la courbure de ses surfaces. Plus la co
est prononcée, moins la distance focale est considéra
qu'on exprime en disant que la lentille a un court foy

Si la lentille est placée à l'ouverture de la chambre ob
on peut suivre dans l'air la marche convergente des r
le cône lumineux s'accuse alors par l'illumination des
sières qui voltigent dans la chambre.

La convergence des rayons lumineux produite par le
tilles bi-convexes s'explique aisément par la marche
lumière réfractée à travers un prisme. On sait que l'eff
duit par ce dernier milieu est de ramener le rayon lum
vers la base du prisme. Or, une lentille bi-convexe peu
considérée comme formée par une série de prismes
posés et dont l'angle est d'autant plus aigu qu'ils s'appro

plus de l'axe principal, la déviation étant d'autant plus forte que l'angle est plus ouvert. La figure 216 suffit pour rendre compte de la convergence, et l'expérience est d'accord avec la théorie pour montrer que le point de concours est sur l'axe principal, pourvu que les rayons soient très-voisins de l'axe.

Examinons les circonstances diverses qui se produisent, quand le point lumineux S s'approche de plus en plus de la lentille, sur l'axe principal. L'explication est du reste la même, quand les rayons lumineux, au lieu de partir d'un point situé à une distance infinie, proviennent d'une lumière située sur l'axe à une distance finie. Seulement, dans ce cas, le foyer ne coïncide plus avec le foyer principal. Tant que ce point est, d'un côté de l lentille, au delà de la distance focale, son foyer S′ se forme sur l'axe au delà du foyer principal, et plus il se rapproche, plus ce foyer s'éloigne. Arrive-t-il à n'être plus éloigné de la lentille que du double de la distance focale, le foyer correspondant est précisément à la même distance. S'il se rapproche encore de la lentille, le foyer continue à s'éloigner rapidement, jusqu'à ce que le point lumineux, atteignant la distance focale même, son foyer disparaisse, ou, ce qui revient au même, s'éloigne à l'infini.

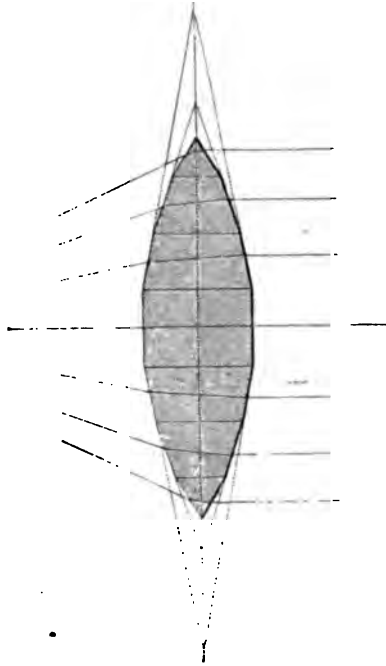


Fig. 216. — La lentille peut être considérée comme un assemblage de prismes.

Jusque-là, la convergence des rayons lumineux s'effectue réellement après leur sortie de la lentille; le foyer est *réel*, ce dont il est facile de s'assurer en recevant le cône lumineux sur un écran où les rayons concentrés produiront une image

de l'objet, un point lumineux, si cet objet est lui-m
point lumineux. De plus, les deux points de l'axe où s
vent l'objet, d'une part, et le foyer de l'autre, sont réci
l'un de l'autre, c'est-à-dire que si le foyer devient l
lumineux, c'est la position première du point lumin

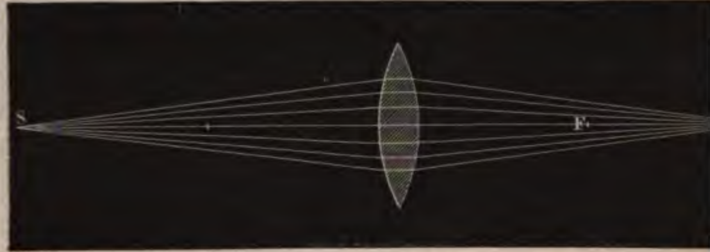


Fig. 217 — Marche des rayons émanés d'un point lumineux sur l'axe. Foyers co

marque le nouveau foyer (fig. 217). Voilà pourquoi les
ciens donnent à ces points, que le calcul permet de
aisément quand on connaît la distance focale princi
nom de *foyers conjugués*. Nous avons constaté le mê
dans les miroirs.

Poursuivons notre étude.

Le point lumineux S s'approche du foyer princip
la lentille ; sa
est moindre
distance foca
218). Alors les
lumineux, ap
émergence,
gnent de l'axe
vergent, de so
n'y a plus d



Fig. 218. — Marche des rayons émanés d'un point situé entre le foyer principal et la lentille; Foyer virtuel.

réel; mais le faisceau divergent prolongé du mêr
que l'objet, converge encore sur l'axe, où il va for
foyer virtuel S'. Il n'est plus possible alors de recue
faisceau sur un écran; mais l'œil reçoit les rayons lu
comme s'ils émanaient de ce foyer, et l'impression

éprouve est celle d'une image du point lumineux. Plus l'objet s'approche de la lentille, plus l'image s'en approche elle-même; et quand l'objet arrive en contact avec la surface transparente, l'image y arrive en même temps que lui.

§ VI. IMAGES FORMÉES PAR LES LENTILLES.

Tous ces résultats se démontrent par le calcul. Mais l'expérience peut les rendre sensibles. C'est ce que nous allons faire avec elle, en examinant les images tant réelles que virtuelles qui se forment aux foyers d'une lentille bi-convexe ou, en général, d'une lentille convergente, lorsqu'on la met en face d'un objet lumineux.

Nous avons déjà vu comment se forme l'image d'un objet dont la distance peut être considérée comme infinie, et qui envoie à la lentille un faisceau de rayons parallèles : c'est ainsi que le Soleil donne une image au foyer principal de la lentille. Si l'objet AB est à une distance finie, mais supérieure au double de la distance focale principale, l'image *ab* se formera au delà du foyer; elle sera réelle, renversée et plus petite que l'objet. Prenons une bougie pour faire l'expérience, et recevons l'image sur un écran que nous rapprocherons ou éloignerons de la lentille, jusqu'à ce qu'il y ait netteté parfaite de l'image : nous constaterons aisément le résultat. Plus la distance de la bougie va diminuer, plus nous verrons l'image, toujours réelle, s'éloigner et grandir, jusqu'à ce qu'elle devienne précisément égale à l'objet lui-même. A cet instant, si l'on mesure les distances qui séparent la lentille de l'écran



Fig. 219 — Image réelle, renversée et plus petite que l'objet.

et de la bougie, on les trouve égales entre elles, et c
est double de la distance focale principale. La bougie
nuant d'approcher de la lentille, l'image réelle gra



Fig 220. — Image réelle, renversée et plus grande que l'objet.

s'éloigne; elle est donc de dimensions plus grandes qu
de l'objet (voy. les figures 220 et 221). Il faut éloig
plus en plus l'écran pour la recevoir nette, mais
marque alor
son éclat un
nution, qui
que par l'
lement des
lumineux é
de la lentille
surface qui cr
vite que la q
de lumière r

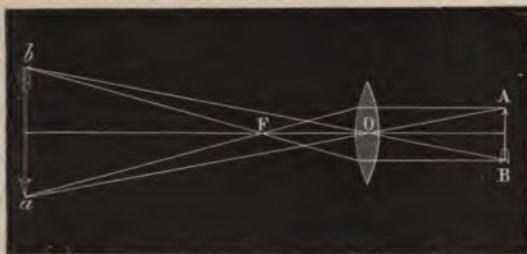


Fig. 221. — Image d'un objet situé à une distance de la lentille, plus grande que la distance focale principale, et moindre que le double de cette distance.

La bougie, une fois arrivée à la distance focale,
disparaît, et cela est aisé à concevoir, puisqu'al
rayons sortant parallèlement à l'axe, il n'y a plus d
vergence. Jusqu'ici, l'image a toujours été réelle : e

tres termes, il a toujours été possible de la recevoir sur un écran; elle a une existence indépendante de l'observateur. Il n'en sera plus de même, si nous continuons à approcher la bougie ou tout autre objet de la lentille : l'écran placé à une distance quelconque ne donnera plus que de la lumière diffuse. Cependant, au lieu et place de l'écran, plaçons notre œil même. Nous verrons au travers de la lentille une image de la bougie, image qui n'est plus renversée, mais droite et grossie. Comment se fait-il que l'œil reçoive la sensation d'une image qui n'a rien alors de réel? Cela est facile à comprendre : les faisceaux lumineux qu'envoie alors à la lentille chacun des points de l'objet, sortent en divergeant du milieu réfringent : l'œil qui les reçoit éprouve la même sensation que s'il s'agissait de rayons émanés directement de points lumineux situés de l'autre côté de la lentille, mais à une plus grande distance que l'objet même auquel ils appartiennent. De là, l'agrandissement des dimensions apparentes ; de là aussi, le sens de l'image qui, devenant virtuelle, cesse d'être renversée (fig. 222). Dans ce cas, à mesure que l'objet se rapproche de la lentille, l'image diminue jusqu'au moment où, venant à toucher l'une de ses faces, l'image est devenue sensiblement égale à l'objet même.



Fig. 222. — Image droite et virtuelle d'un objet situé entre le foyer principal et la lentille.

Voilà pour les images que produisent les lentilles convergentes.

Les lentilles divergentes n'ont pas de foyer réel. Par exemple, si l'on considère un faisceau de rayons parallèles à l'axe — c'est le cas où le point lumineux est situé sur l'axe à une distance infinie — en sortant de la lentille, les rayons

divergent; leur point de concours est situé sur l'axe en avant de la lentille : c'est ce qu'on nomme le foyer principal, foyer qui n'est plus réel, mais virtuel. L'œil, qui reçoit le faisceau divergent au sortir de la lentille, éprouve la même sensation que s'il existait réellement un point lumineux au foyer.

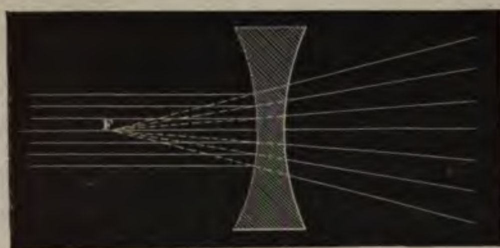


Fig. 223. — Foyer principal virtuel des lentilles divergentes.

Avec les lentilles divergentes, il n'y a jamais non plus d'image réelle, par la raison que les rayons lumineux, au sortir du milieu réfringent, s'éloignant les uns des autres, n'ont pas de point effectif de réunion. Mais en leur appliquant ce qu'on vient de dire du cas où l'image donnée par une lentille convergente est droite et virtuelle, on comprend que les images des lentilles divergentes sont pareillement virtuelles et droites. Seulement, il y a cette différence, que leurs dimensions apparentes sont toujours moindres que celles des objets qu'elles représentent. La figure 224 montre la raison de ce dernier fait, et permet de comprendre pourquoi les images, d'autant plus petites que l'objet est plus éloigné, finissent par atteindre en grandeur l'objet même, quand ce dernier arrive à toucher la lentille.

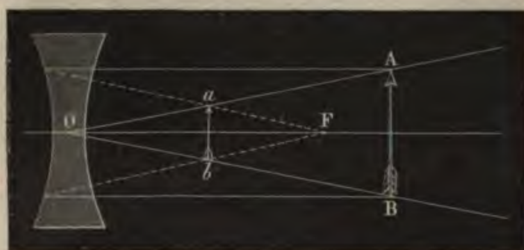


Fig. 224. — Image droite virtuelle et plus petite que l'objet, dans une lentille bi-concave.

§ VII. DE QUELQUES APPAREILS FONDÉS SUR LES LOIS DE LA RÉFRACTION SIMPLE.

Les lentilles, tant convergentes que divergentes, entrent dans la construction de nombreux appareils d'optique, dans



Fig. 225. — Chambre noire.

les lunettes astronomiques, les télescopes, les microscopes, les phares, etc. Nous décrirons les plus importantes dans le volume qui traite des APPLICATIONS DE LA PHYSIQUE, et nous verrons quel parti merveilleux la science a su tirer de leurs propriétés. Ici, nous nous bornerons à indiquer la construction des plus simples appareils, dans lesquels les images réelles sont utilisées pour produire tel ou tel effet d'optique : ce sont notamment la *chambre noire*, le *mégascope*, la *lanterne magique*, le *microscope solaire* et le *phantascope*.

Nous avons déjà vu, en parlant de la propagation de : mière en ligne droite, que si, dans le volet d'une ch parfaitement close, on perce un petit trou, l'image des extérieurs vient se former sur un écran. Cette image r sée n'est bien nette que pour les objets éloignés.

Pour obvier à cet inconvénient et donner plus d'écl images, un physicien du dix-septième siècle, Porta, eut de recevoir la lumière sur un miroir sphérique conca réfléchissait les rayons et l'image sur un écran. Mais il des effets beaucoup plus remarquables, en adaptant a du volet une lentille convergente. L' des objets extérieurs vint se peindre avec netteté sur l'écran, dont la dist l'ouverture du volet dépend de la di des objets eux-mêmes. Il est facile leurs de trouver cette distance par nements. Les dessinateurs emploi chambre noire ainsi perfectionnée, tracer sur un papier les contours d sage qu'ils veulent reproduire. C donne alors la forme qu'indique la 225. Au lieu d'une lentille, on e un prisme (fig. 226) dont la face t vers les objets est convexe et qui, par la réflexion sur sa face plane inclinée de 45 degrés, renvoie les fai de lumière sur la table où est placé le papier blan l'image se forme avec toute sa netteté, et le dessinate plus qu'à en suivre au crayon les contours. Cette m tion de la chambre noire est due à l'opticien C. Che

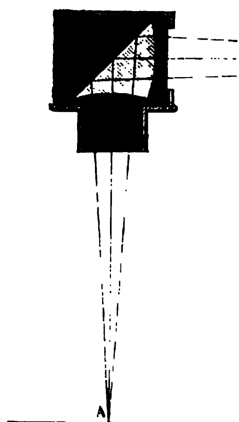


Fig. 226. — Lentille-prisme de la chambre noire.

Le *mégascope* est une chambre noire imaginée pou mettre la reproduction sur une échelle agrandie d'u quelconque, statuette, tableau, etc. La figure 227 no pensera d'une description détaillée; nous dirons seu que, l'éclat de l'image étant affaibli par la dispersion l'agrandissement, on se sert d'un miroir pour envo

rayons du soleil sur l'objet, et obtenir un éclairement suffisamment intense.

La *lanterne magique* est un mégascope dans lequel les



Fig. 227. — Mégascope.

objets sont éclairés par la lumière d'une lampe à réflecteur. A l'aide de cet appareil, on projette sur un écran les images agrandies de dessins peints sur verre avec des couleurs translucides. Le tube, en travers duquel on place ces dessins renversés, renferme un système de deux lentilles, l'une plan-convexe, l'autre bi-convexe, qui donnent une image

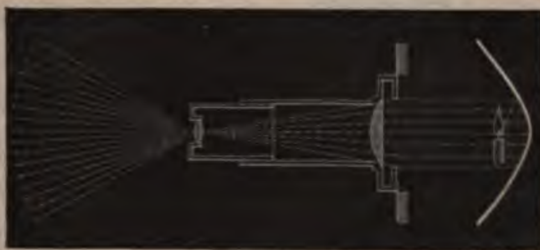


Fig. 228. — Lanterne magique.

droite reçue sur un écran placé en avant de l'instrument.

En employant la lumière Drummond pour éclairer les objets, on obtient des images beaucoup plus vives; et dès lors, en éloignant l'écran et rapprochant les lentilles, on peut agrandir beaucoup plus les objets.

Vers la fin du siècle dernier, un physicien belge,
son, obtint un succès extraordinaire en montrant au pu
apparitions de fantômes, qui, dans l'obscurité profond
trouvaient les spectateurs, semblaient s'avancer peu à
grandir jusqu'au milieu de la salle. L'illusion de ce
était obtenue au moyen d'un appareil nommé *phant*
tout à fait analogue à la lanterne magique, c'est-à-dir
d'une caisse renfermant une lampe à réflecteur, d'u
avec le même système de deux lentilles projetant l'ima
dessin sur un écran placé en avant de l'instrument.
ment, la lanterne est supportée par une table roulant
l'un des pieds porte une poulie, qui communique so
vement à la lentille objectif par l'intermédiaire d'un
trique et d'un levier. Quand la table roule en s'éloig
l'écran, l'objectif se rapproche peu à peu de la dem
l'image grandit, et l'illusion est produite, d'autant pl
plète, qu'à l'aide d'un di
me mobile, la lumière
çoit l'image varie propor
lement à sa grandeur.



Fig. 229. — Phantascope.

Robertson, qui devait,
il, le secret de cette inv
un artiste nommé de W
avait soin d'écarter toute l
étrangère, tout bruit de
reil, dont les roues étaie
nies d'étoffe. De là, une
qu'il augmentait encore
tant le bruit du tonnerre
pluie, les cris des anima
Dans la figure 229,
voir qu'il y a une doub
terne. On peut dès lors projeter sur l'écran, outre l'im
spectre ou de tout autre personnage fantastique, cell
paysage en harmonie avec la scène à produire.

Le même double appareil donne aussi les vues *polyoramiques :* on entend par là des effets de paysage variés, la succession du jour à la nuit, d'une mer calme à la tempête, etc. Chaque lanterne est disposée de manière à projeter chaque double vue au même endroit de l'écran. L'une d'elles est d'abord fermée et l'on voit le paysage éclairé par le Soleil ; peu à peu la lumière s'affaiblit, le crépuscule arrive, puis la nuit, et, insensiblement, la seconde vue s'est substituée à la première. Les enfants, on peut dire aussi les grandes personnes, prennent souvent plaisir à admirer ces tableaux et ces effets de lumière. Comme ici c'est le principe qui nous intéresse plutôt que les détails des mécanismes imaginés pour en tirer parti, nous insisterons seulement sur ce point que la chambre noire, les mégascopes, lanternes magiques, phantascopes sont tous basés sur la formation d'images réelles par l'intermédiaire de lentilles convergentes. Tel est aussi le principe du *microscope solaire,* non moins intéressant, selon nous, que les instruments décrits plus haut, et certainement plus utile à l'étude et à l'enseignement des sciences.

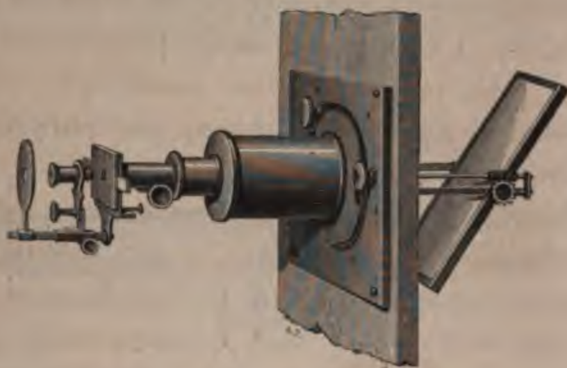


Fig. 230. — Microscope solaire. Vue d'ensemble.

Le microscope solaire est destiné à projeter sur un écran l'image considérablement agrandie d'un objet très-petit. C'est un mégascope, dont la disposition particulière permet d'observer commodément et de faire voir à un grand nombre de spectateurs l'image dont nous parlons. Dans ce but, l'objet est placé un peu au delà du foyer principal d'une lentille à court foyer. Le grossissement, d'après ce que nous avons vu, sera d'autant plus considérable que la distance de l'objet au foyer

sera plus petite. Mais alors l'image ira se former à u
tance d'autant plus grande de la lentille ; et plus le gr
ment sera fort, plus la lumière se trouvera éparpillée
suite affaiblie ; de là, la nécessité d'éclairer très-viveme
jet, de façon que l'image conserve un éclat suffisant.
pourquoi l'on reçoit sur une glace convenablement in
soit les rayons du soleil, soit ceux d'une source très-i
comme la lumière électrique. La glace les réfléchit et
voie sur une lentille à grande ouverture qui les fait con
une première fois. Une seconde lentille les concentre
foyer, et c'est en ce dernier point que se trouve placé

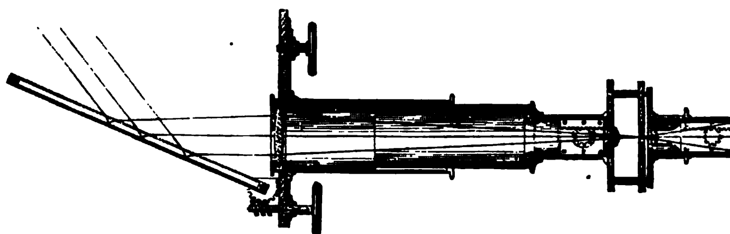


Fig. 231. — Coupe du microscope solaire.

dont on veut étudier les détails de structure. Les figur
et 231 donnent l'ensemble du microscope solaire et s
struction interne.

On nomme microscope à gaz celui dans lequel l'ol
éclairé par la lumière Drummond : et microscope phot
trique, celui dans lequel c'est la lumière très-vive de l'a
taïque qui supplée aux rayons solaires.

Rien n'est plus curieux que de voir, dans les co
physique, les images prodigieusement agrandies des
organiques des animaux les plus infimes, les infusoires
meuvent dans une goutte de colle ou de tout autre liqu
fermentation, la décomposition spontanée de l'eau en gl
gazeux d'oxygène et d'hydrogène, la cristallisation de
la structure des tissus animaux et végétaux.

CHAPITRE V.

ANALYSE DE LA LUMIÈRE.

§ I. DÉCOMPOSITION ET RECOMPOSITION DE LA LUMIÈRE BLANCHE.

La lumière que les physiciens prennent pour type de toutes les autres au point de vue de la couleur, est celle du Soleil.

La lumière du Soleil est blanche. Une expérience bien simple permet de le constater. Si, dans l'intérieur de la chambre obscure, on reçoit directement sur un écran de papier blanc la lumière solaire, après qu'elle a passé par un trou percé dans le volet, l'image du Soleil sur le papier sera, comme on le sait, une tache ronde et blanche. Hors de la chambre obscure, l'expérience ne serait pas concluante, parce que le papier pourrait recevoir, outre les rayons solaires, les rayons réfléchis à la surface d'autres corps diversement colorés.

Mais cette lumière blanche n'est pas simple. C'est un composé d'une multitude de couleurs ou de nuances qui sont elles-mêmes autant de couleurs simples. Ce résultat a été mis hors de doute par une suite d'expériences qu'on a variées sous toutes les formes, mais qui, la plupart, sont dues à Newton. Indiquons les plus concluantes.

On place sur la route des rayons solaires, après leur passage par le trou rond du volet de la chambre obscure, un prisme triangulaire en flint-glass, par exemple, de manière que ses arêtes soient placées horizontalement et que le faisceau lumineux pénètre obliquement par l'une des faces. Alors, on aperçoit sur l'écran, au lieu de l'image ronde et blanche du Soleil,

et à une certaine distance au-dessus du point où elle se fo
avant l'interposition du prisme, une bande allongée lumin
formée d'une suite de couleurs extrêmement vives : c'est
bande qu'on nomme le *spectre solaire*.

Voici dans quel ordre s'y succèdent les couleurs, qua
prisme a sa base tournée vers le haut ; l'ordre serait in



Fig. 232. — Décomposition de la lumière par le prisme. Inégale réfrangibilité des couleurs du spectre.

si cette base était tournée vers le plancher de la cha
obscure :

A l'extrémité inférieure du spectre est un rouge bri
vif et plein, auquel succède une teinte orangée et par gr
tions insensibles, un magnifique jaune-paille. Vient ensui
vert d'une pureté et d'une intensité remarquables, puis
teinte bleu-verdâtre, et après, une couleur bleue pronc
qui se fonce jusqu'à l'indigo. Après l'indigo, vient le vi
dont la nuance livide termine le spectre. On peut voir da

planche IV, figure 1, la suite des couleurs du spectre solaire, obtenu par un prisme de sulfure de carbone.

Ainsi un rayon de lumière blanche est bien, comme nous l'avons annoncé, la réunion d'une série de rayons colorés dont nous venons seulement de nommer les principaux ; car la dégradation d'une couleur à la suivante se fait d'une manière insensible, et il n'y a pas, de l'une à l'autre, de changement brusque de nuance, ni de solution de continuité [1].

Tel est le phénomène de la décomposition ou analyse de la lumière, qu'on nomme aussi la *dispersion* des rayons colorés.

Cette dispersion de la lumière blanche par réfraction se manifeste à nous tous les jours par nombre de phénomènes, que les anciens connaissaient dès lors certainement comme nous, mais sans en avoir soupçonné la cause. Les pierres précieuses, les diamants lancent des feux de diverses couleurs, et ce n'est pas une des moindres beautés de la précieuse substance de décomposer, à travers ses facettes, les rayons lumineux. L'arc-en-ciel est un phénomène dû à la même cause, comme nous le montrerons dans la description des météores. Il en est de même des couleurs variées dont se teignent les nuages et les couches atmosphériques, à l'instant où ont lieu les crépuscules et les aurores. Enfin, dans les vases en verre contenant des liquides transparents, dans les morceaux de verre taillé dont on orne les lustres, on aperçoit dans certaines directions des franges irisées offrant dans toute leur pureté les couleurs du spectre.

Une seconde expérience prouve à la fois qu'un rayon de chacune des couleurs du spectre est simple, et que son degré de réfrangibilité va en croissant du rouge au violet. Cette expérience consiste à laisser passer par un petit trou pratiqué dans l'écran, à l'endroit où se forme le rouge par exemple, un étroit pinceau de cette couleur. Reçu sur un second écran (fig. 232), ce pinceau forme une image rouge en un point qu'on note avec

1. Sauf par des raies noires très-fines dont nous parlerons plus loin.

soin. Si, au lieu de le recevoir directement sur cet écr interpose un second prisme, le pinceau lumineux reçc nouvelle déviation, et son image va se former en un poi élevé que l'image directe. Mais la nouvelle image est comme la première, et de même forme si le prisme est nablement placé. La lumière rouge du spectre ne peut d décomposer.

Or, la même expérience, répétée sur les couleurs succe donne des résultats analogues. Donc, toutes les coule spectre solaire sont indécomposables ou simples. Mai réfrangibilité est croissante : car on remarque que les di entre les images directes des couleurs sur l'écran et l obtenue par la réfraction dans le second prisme, sont d' plus grandes que la couleur est plus rapprochée de l'ext violette du spectre.

Si, au lieu d'un prisme formé de flint-glass, on empl prisme d'une autre substance réfringente, solide ou li on obtient des spectres plus ou moins brillants et plus ou allongés ; si les prismes sont incolores, les spectres sont posés des mêmes couleurs, rangées dans le même ordr leur proportion, les espaces occupés par chacune d'ell rient suivant la nature de la substance, tandis que l'or couleurs reste le même. C'est le flint-glass qui, parmi lides, donne le spectre le plus étendu, surtout dans le et le sulfure de carbone, parmi les liquides.

L'angle du prisme influe aussi sur l'étendue du spect duit, étendue qui est d'autant plus grande que l'angle e ouvert. C'est un fait qu'on vérifie aisément par l'expéri l'aide des prismes à angles variables dont nous avons pa haut.

Ainsi la lumière blanche se décompose par la réfract rayons diversement colorés, et la couleur de chacun des correspond à un degré de réfrangibilité particulier. Voil l'analyse de la lumière.

Mais, si telle est, en effet, la composition de la lu

il doit en résulter qu'en réunissant, dans une proportion convenable, toutes les couleurs du spectre, le mélange des rayons colorés formera un faisceau de lumière blanche. Des expériences variées confirment pleinement cette conséquence de l'analyse de la lumière. La plupart de ces expériences sont dues à Newton, qui les décrit dans son *Optique*, et l'on ne fait guère aujourd'hui que les reproduire dans les cours avec de légères modifications.

La plus simple de toutes consiste à recevoir sur une lentille convergente le spectre solaire étalé par un prisme. En plaçant



Fig. 233. — Recomposition de la lumière par une lentille.

un écran de papier blanc au foyer où se réunissent les rayons des diverses couleurs, (c'est le foyer conjugué du point où les rayons émergent du prisme) on aperçoit une image blanche du soleil (fig. 233). En approchant l'écran de la lentille, les rayons de couleur, non réunis encore, reparaissent d'autant plus vifs que l'écran est plus loin de ce foyer. Au contraire, l'écran est-il éloigné de la lentille, à partir du point de convergence, les couleurs reparaissent encore, de sorte que le rouge, précédemment en bas, se trouve placé en haut, et le violet d'abord en haut est situé à la partie inférieure de l'image colorée.

A l'aide de deux prismes de même substance et de
angle, mais opposés de position, ainsi que le montre la fi
le faisceau de lumière blanche qui tombe dans le p
prisme se divise en rayons divergents et diversement c
mais la réfraction les ramène au parallélisme, à leur
gence du secon
me, et alors a
d'un spectre,
tient un faiscea
mière blanche
sée par la réuni
rayons de d
couleurs. Seul
le bord supérie
l'image reçue s
écran est rouge
bord inférieur e



Fig. 234. — Recomposition de la lumière par les prismes.

let. Cela vient de ce que, parmi tous les rayons de l
blanche formant le faisceau, les rayons moyens seuls d
lieu à des spectres dont les couleurs se rassemblent e
tandis que les rayons extrêmes du spectre ne se sont
posés avec aucune autre couleur, et la recomposition
s'effectuer en ces points.

Deux spectres obtenus au moyen de deux prismes diff
et projetés en sens inverse sur un écran donnent du bl
l'endroit où les couleurs se superposent.

Le spectre donné par un prisme étant observé avec
cond prisme, on retrouve une position pour laquelle l'
reçue dans l'œil est ronde et blanche.

Toutes ces expériences et d'autres encore sont décrit
Newton avec une clarté et une simplicité admirables.
qu'ici, dit-il, j'ai produit du blanc en mêlant les couleu
prismes. Maintenant, pour mêler les couleurs des corps
rels, prenez de l'eau un peu épaissie avec du savon, et
la jusqu'à ce qu'elle s'élève en écume. Après que cette

sera un peu reposée, vous n'avez qu'à la regarder attentivement, et vous verrez partout diverses couleurs sur la surface de chacune des bulles dont cette écume est composée. Mais si vous vous éloignez au point de ne pouvoir plus distinguer les couleurs l'une de l'autre, toute l'écume vous apparaîtra d'une parfaite blancheur. » (*Optique*, liv. I.)

Il essaya aussi d'obtenir la couleur blanche par le mélange, en proportions diverses, de certaines poudres colorées. De l'orpiment (sulfure d'arsenic de couleur jaune–orangé) mélangé de pourpre, de vert de gris et d'azur, lui donna un composé d'un gris cendré qui, exposé au soleil, et comparé à un morceau de papier blanc de même grandeur, posé à côté du mélange et à l'ombre, parut d'un blanc éclatant. Newton explique la couleur grise des mélanges de ce genre par l'absorption de lumière des éléments, et c'est pour obvier à cette diminution d'éclat qu'il jugea convenable d'éclairer fortement le composé par les rayons solaires.

Enfin, si l'on fait tourner rapidement un cercle, divisé en secteurs qu'on a colorés des couleurs principales du spectre, autour d'un axe qui passe par son centre, à mesure que la rotation devient plus rapide, les couleurs disparaissent à l'œil. Le disque prend une teinte d'autant plus blanche que la proportion des diverses couleurs aura été mieux observée. On comprend qu'alors les impressions successives des diverses couleurs sur la rétine se confondant, grâce à la rapidité du mouvement, les



Fig. 235. — Recomposition de la lumière par un disque tournant.

choses se passent comme si les rayons faisaient leur im] sion· simultanément, et la sensation qui en résulte est cel la couleur blanche.

Toute lumière dont le Soleil est la source, celle des nu de l'atmosphère, la lumière de la Lune et des planètes, nent lieu aux mêmes phénomènes de décomposition e recomposition. Analysées à l'aide du prisme, elles pr sent des spectres d'éclat très-variable, mais dont la position en rayons colorés est précisément celle du sp solaire.

Les lumières provenant d'autres sources, des étoiles, flammes artificielles, du dégagement de l'électricité soit les appareils de physique, soit dans les orages, donnent t des spectres, dans lesquels les couleurs sont disposées le même ordre que les couleurs du spectre solaire. Mai général, le phénomène est moins brillant; et, comme le verrons bientôt, il arrive que telles ou telles couleurs quent, et alors elles se trouvent remplacées par des ba obscures.

Les expériences qui servent à montrer que les div couleurs du spectre donnent, par leur réunion, de la lun blanche, sont aussi concluantes, quand on emploie les ra colorés du spectre, que si l'on se sert des couleurs des c éclairés. Cela seul suffirait pour prouver que ces dern couleurs sont, comme celles des sources lumineuses, iné ment réfrangibles. Mais Newton a fait des expériences dir sur cette différence. Il a examiné, à l'aide d'un prisme morceau de papier dont les deux moitiés étaient peint couleurs différentes, l'une rouge, l'autre bleue; et, en di sant le prisme et le papier au devant d'une fenêtre, co l'indique la figure 236, il a remarqué que les deux moitié papier paraissaient inégalement déviées, la moitié bleu trouvant transportée un peu plus bas que la moitié roug sorte que le morceau de papier parut divisé en deux pa dont l'une n'était plus le prolongement de l'autre. Le cont

arrivait, si l'angle du prisme était placé en sens inverse. Ainsi le bleu était plus réfrangible que le rouge.



Fig. 236. — Inégales réfrangibilités des diverses couleurs.

En recevant derrière une lentille et sur un écran de papier



Fig. 237. — Inégales réfrangibilités des couleurs simples. Expérience de Newton.

blanc les images du même papier éclairé par une chandelle, Newton reconnut pareillement qu'il fallait placer l'écran à des

distances différentes pour obtenir des images nettes de l
tié rouge et de la moitié bleue. Un fil de soie très-noir
entourait le papier plusieurs fois, permettait de juger ave
de facilité l'endroit où l'image de chaque couleur se
avec netteté; car, en d'autres points, les raies noires é
mal terminées et confuses. Pour la moitié bleue, la di
de l'image à la lentille se trouva plus petite que pour la
rouge, ce qui montre encore que le bleu est plus réfra
que le rouge. Ces deux expériences sont les première
Newton décrit dans son *Optique.*

§ II. COULEURS DES CORPS.

Ce que nous nommons *couleur naturelle* d'un corps
la couleur dont il nous apparaît, quand il est éclair
une lumière blanche très-pure, celle des rayons solair
exemple.

Le corps est-il apte à réfléchir dans une égale prop
toutes les couleurs de la lumière blanche, il est blan
même, et d'un blanc d'autant plus éclatant que cette
portion est plus grande. A mesure, au contraire, que
proportion diminue, la couleur blanche diminue d'int
devient grisâtre, de plus en plus foncée, et enfin atte
noir, quand l'absorption de tous les rayons colorés du s
est aussi complète que possible. Les corps *noirs* sont don
dont la constitution moléculaire est telle, que tous les
de la lumière blanche sont absorbés par leur surface,
que les corps *blancs* sont ceux qui les réfléchissent tous.

Si la surface du corps a la propriété d'absorber to
rayons colorés du spectre, une exceptée, le rouge je su
le corps nous semble rouge, parce qu'il ne réfléchit vers
œil que les rayons rouges du spectre. Si elle n'absorbe c
portion plus restreinte des rayons colorés, la couleur du
sera celle qui provient du mélange des rayons non abs

et c'est là ce qui explique le nombre considérable des couleurs et des nuances des corps, nuances et couleurs beaucoup plus variées que celles dont le spectre lui-même est composé. Ainsi les corps *colorés* sont ceux qui, réfléchissant certains rayons, absorbent les autres. Si cette explication est vraie, elle est susceptible de diverses vérifications expérimentales.

Prenons un corps blanc, et faisons en sorte qu'il ne reçoive que les rayons jaunes du spectre obtenu par un prisme. Le corps paraîtra jaune; il serait rouge, vert, bleu, etc., s'il n'était éclairé que par les rayons rouges ou verts, ou bleus. Au contraire, un corps noir restera noir, quelle que soit la couleur dont il est éclairé. Enfin, un corps rouge paraîtra d'un rouge intense, si on l'éclaire avec la lumière provenant des rayons rouges du spectre, tandis qu'il paraît noir, si on l'expose aux rayons des autres couleurs.

L'expérience confirme tous ces résultats. On observe cependant que les corps colorés prennent la teinte des rayons qui les éclairent, alors même que ces rayons n'ont pas la couleur de ces corps; mais cette teinte est d'autant plus vive, qu'il y a une plus grande analogie entre leur couleur propre et celle des rayons dont on les éclaire. Ainsi, « le vermillon placé dans le rouge paraît du rouge le plus éclatant. Dans l'orangé et le jaune, il semble orangé et jaune, mais son éclat est moindre. Les rayons verts lui donnent aussi leur couleur, mais, à cause de la grande inaptitude du rouge à réfléchir la lumière verte, il paraît sombre et terne; il le devient davantage encore dans le bleu, et dans l'indigo et le violet, il est presque entièrement noir. D'un autre côté, un morceau de papier bleu foncé ou bleu de Prusse prend un éclat extraordinaire, quand on l'expose aux rayons indigos. Dans le vert, il devient vert, mais avec un moindre éclat; dans le rouge, il paraît presque noir. » (Herschel). Il faut donc comprendre la théorie de Newton dans ce sens que les surfaces des corps colorés sont en général aptes à réfléchir les rayons d'une certaine couleur en quantité beaucoup plus grande que ceux des autres rayons; et c'est là

ce qui les empêche d'être complétement noirs, quand
éclaire avec une lumière dont la couleur est différente d
couleur propre.

Les couleurs des corps sont rarement identiques avec
dont le spectre solaire est formé : la plupart sont comp
comme on s'en assure du reste, en les soumettant isolén
l'analyse du prisme. Cette analyse donne un spectre for
diverses couleurs simples dont le mélange produit la c
particulière observée. Il suffit de regarder un objet color
fleur, un morceau d'étoffe, à travers un prisme, pou
que les bords de l'image parallèles à l'arête du prism
irisés.

Si, au lieu d'éclairer un corps coloré à l'aide de la lu
blanche du Soleil, ou de l'une ou de l'autre des couleur
ples dont cette lumière est formée, on l'éclaire en emp
d'autres sources lumineuses, telles que la lumière d'une
ou certaines flammes artificielles, sa couleur se trouve a
Ainsi tout le monde sait que le vert paraît bleu le soi
lumière d'une lampe ou d'une bougie. Cela tient à
cette lumière renferme moins de rayons jaunes que la lu
du jour : or, le vert étant une couleur qu'on obtient
mélange du jaune et du bleu, si le jaune fait défaut ou m
en partie, la nuance résistante tire plus ou moins sur le
Cette dernière remarque nous conduit à parler des co
qu'on obtient par le mélange des couleurs simples. Ma
paravant, terminons ce que nous voulions dire de la t
de Newton sur les couleurs des corps non lumineux pa
mêmes.

Cherchant à pénétrer plus profondément dans les cau
phénomène, Newton suppose que la lumière incidente
composée à la surface. Une partie est absorbée, éteint
les corps opaques, et transmise dans les corps transpa
L'autre partie est réfléchie par les molécules superficie
une faible profondeur dans les corps opaques, et à des p
deurs quelconques dans les corps transparents. C'est

explique pourquoi, dans ces derniers, la couleur de la lumière transmise est en général différente de celle de la lumière réfléchie. Nous avons vu, par exemple, que l'or réduit en feuilles extrêmement minces laisse passer une lumière d'un bleu verdâtre ; sa couleur réfléchie est jaune ou jaune rougeâtre. « Halley étant descendu sous l'eau à une profondeur de plusieurs brasses dans une cloche à plongeur, vit de couleur cramoisie le dessus de sa main, sur laquelle tombaient les rayons solaires, passant par une ouverture vitrée, tandis que le dessous illuminé par la lumière que réfléchissaient les parties profondes de l'eau paraissait vert; d'où Newton conclut que l'eau laisse passer les rayons rouges et réfléchit les rayons violets et bleus. » (Daguin.)

Il faut distinguer, du reste, entre la lumière réfléchie régulièrement ou spéculairement, et celle dont la réflexion à la surface des corps est diffuse. La première n'est pour rien dans la couleur du corps, et nous savons en effet que les corps parfaitement polis donnent les images des corps qu'ils réfléchissent, colorées comme ces corps eux-mêmes ; et leur propre couleur reste insensible ou inaperçue.

Quelle est la modification subie par la lumière réfléchie diffusément ? Comment la structure des corps agit-elle sur les différents rayons colorés, pour renvoyer les uns et éteindre les autres ? Est-ce la forme, la densité, le pouvoir réfringent des molécules, ou bien sont-ce ces élements réunis qui donnent lieu au phénomène des colorations diverses ? Ce sont là des questions excessivement délicates, auxquelles on ne peut encore répondre avec certitude dans l'état actuel de la science.

§ III. CLASSIFICATION DES COULEURS.

La lumière blanche du Soleil, décomposée par le prisme, donne lieu à une série de couleurs qui correspondent, nous l'avons vu, à des degrés différents de réfrangibilité. Ces cou-

leurs sont, pour ainsi dire, en nombre infini, puisqu'on d'une extrémité à l'autre du spectre par des nuances ir bles; mais il est d'usage de distinguer sept couleurs] pales dont les noms, pris dans leur ordre naturel, form mauvais vers alexandrin que voici :

violet, indigo, bleu, vert, jaune, orangé, rouge.

Quelques physiciens, se fondant sur la possibilité de duire certaines d'entre elles par le mélange des autres, (nir, par exemple, du vert par la juxtaposition du jaune bleu, du violet par celle du bleu et du rouge, etc. ont c à démontrer que le spectre n'est formé que de *trois* cc élémentaires. D'après Brewster, ces couleurs seraient le le jaune et le bleu; d'après Young, le rouge, le vert et let. Les proportions dans lesquelles ces couleurs se m(raient dans les diverses parties du spectre, rendraient de la variété des nuances dont il est composé.

Aujourd'hui, on rejette ces dernières théories, les ex ces sur lesquelles leurs auteurs les appuyaient, ayant montrées inexactes. Toutes les couleurs du spectre soı des couleurs simples dont le nombre, je le répète, pe considéré comme illimité, bien que dans la pratique oı duise à sept couleurs principales.

Le *blanc* n'est pas une couleur simple ; c'est, au coı la plus complexe de toutes les couleurs composées. I n'est pas une couleur; c'est l'absence complète de to mière. Quant aux couleurs composées, telles que nous sentent les corps naturels, elles sont dues à des mélan proportions variées, de toutes les couleurs élémentair(

Une expérience bien simple démontre que le conc(tous les rayons du spectre est nécessaire pour prod blanc parfait. Elle consiste à intercepter une partie q que du spectre, avant qu'il ne tombe sur la lentille qu la recomposition de la lumière. « Ainsi, quand on int le violet, le blanc prend une teinte jaune; si l'on sı



CLASSIFICATION DES COULEURS

d'après le Système de M. Chevreul

CERCLE CHROMATIQUE DES COULEURS FRANCHES

lesquelles, peut ainsi être en nombre infini, puisqu' d'une extrémité à l'autre du spectre par des nuance bles; mais il est d'usage de distinguer sept couleu pales dont les noms, pris dans leur ordre naturel, f ment un vers alexandrin que voici :

violet, indigo, bleu, vert, jaune, orangé, rou

Quelques physiciens, se fondant sur la possibilité [illegible] d'entre elles par le mélange des autr tes, par exemple, du vert par la juxtaposition du jau bleu, du violet par celle du bleu et du rouge, etc. on à démontrer que le spectre n'est formé que de *trois* *élémentaires*. D'après Brewster, ces couleurs seraient le jaune et le bleu; d'après Young, le rouge, le vert let. Les proportions dans lesquelles ces couleurs se ment dans les diverses parties du spectre, rendraie de la variété des nuances dont il est composé.

Aujourd'hui, on rejette ces dernières théories, les ces sur lesquelles leurs auteurs les appuyaient, ayan montrées inexactes. Toutes les couleurs du spectre des couleurs simples dont le nombre, je le répète, considéré comme illimité, bien que dans la pratique borne à sept couleurs principales.

Le *blanc* n'est pas une couleur simple; c'est au la plus complexe de toutes les couleurs composées n'est pas une couleur; c'est l'absence complète de mière. Quant aux couleurs composées, telles que no sentent les corps naturels, elles sont dues à des mél proportions variées, de toutes les couleurs élément

Une expérience bien simple démontre que le co tous les rayons du spectre est nécessaire pour pr blanc parfait. Elle consiste à intercepter une partie que du spectre, avant qu'il ne tombe sur la lentille la recomposition de la lumière. « Ainsi, quand on le violet, le blanc prend une teinte jaune; si l'on



CLASSIFICATION DES COULEURS

d'après le Système de M. Chevreul.

CERCLE CHROMATIQUE DES COULEURS FRANCHES.

ensuite successivement le bleu, le vert, ce jaune devient de plus en plus rouge, et passe par l'orangé au rouge écarlate et au rouge ponceau. Si l'on commence par supprimer l'extrémité rouge du spectre, on fera passer le blanc au vert pâle, puis au vert éclatant, au bleu verdâtre, au bleu et enfin au violet, en interceptant successivement les rayons les moins réfrangibles. Si c'est le milieu du spectre qui est intercepté, la concentration du reste des rayons produira diverses nuances de pourpre, de cramoisi, etc., suivant la partie qu'on aura supprimée. On peut, en interceptant certains rayons, obtenir telle couleur que l'on voudra, et il n'y a point de nuances dans la nature que l'on ne puisse imiter ainsi parfaitement, avec un éclat et une richesse que les couleurs artificielles ne peuvent jamais atteindre. » (J. Herschel, *Traité de la lumière.*)

Le nombre des couleurs composées, obtenues par le mélange des couleurs simples ou des divers rayons colorés du spectre, s'accroît ainsi d'une façon pour ainsi dire indéfinie. Mais nous allons voir bientôt qu'il est possible de l'augmenter encore, soit par l'addition d'une certaine quantité de lumière blanche, soit par le mélange du noir en proportion variable.

Deux couleurs qui, par leur mélange, produisent du blanc sont ce qu'on nomme des *couleurs complémentaires.*

Il y a un moyen assez simple de déterminer les groupes de couleurs qui jouissent de cette propriété : c'est d'intercepter au sortir de la lentille une partie du faisceau convergent qui allait former au foyer de la lumière blanche. Cette portion reçue par un second prisme sera déviée, et donnera une couleur qui sera évidemment complémentaire de la couleur produite au foyer de la lentille, puisque, avant leur séparation, elles formaient du blanc.

Helmholtz a reconnu, par un procédé différent qui consiste à recevoir deux couleurs du spectre à travers les fentes d'un écran et à les concentrer à l'aide d'une lentille, qu'il y a un nombre indéfini de groupes de deux couleurs susceptibles de

former, par leur mélange, du blanc parfait. Voici quelques-uns des résultats obtenus par ce physicien :

Couleurs complémentaires.	Intensités des deux couleurs.		
Violet — jaune verdâtre.	1	—	10
Indigo — jaune	1	—	4
Bleu — orangé	1	—	1
Bleu verdâtre — rouge	1	—	0. 44

Les nombres qui suivent les groupes mesurent les intensités relatives de chacune des couleurs et correspondent à une lumière vive : ils varient quand la lumière incidente varie elle-même d'intensité.

Helmholtz donne un moyen extrêmement simple pour étudier le résultat du mélange de deux couleurs. Sur une table noire, on pose deux disques colorés, l'un de la première, l'autre de la seconde couleur. Puis on place verticalement entre les deux une glace sans tain. L'un des disques est vu directement; l'autre s'aperçoit au travers de la lame transparente. En outre, le premier est vu une seconde fois par réflexion. Si on le place alors de telle façon que son image semble superposée au disque vu à travers la glace, les deux couleurs se trouveront naturellement mélangées, et l'on jugera aisément de la nuance produite par leur composition. C'est ainsi que deux disques colorés, l'un par le jaune de chrome, l'autre par le bleu d'azur de cobalt, donnent du blanc pur, ce qui prouve que ces couleurs sont complémentaires.

En résumé, une couleur simple ou composée a toujours sa couleur complémentaire : de plus, elle en a une infinité, car si, à la couleur complémentaire, on ajoute des proportions variables de lumière blanche, le résultat ne peut être que du blanc. Mais il ne faut appliquer cette règle qu'aux couleurs franches, c'est-à-dire à celles qui ne sont pas altérées par une proportion quelconque de noir : en ce cas, au lieu d'un blanc parfait, on n'obtiendrait qu'un gris plus ou moins foncé.

Enfin, le mélange des couleurs complémentaires ne produit



CLASSIFICATION DES COULEURS

d'après le Système de M. Chevreul

CERCLE CHROMATIQUE [illegible]

former, par leur mélange, du [illegible] Voici [illegible] nos des résultats obtenus par ce [illegible]

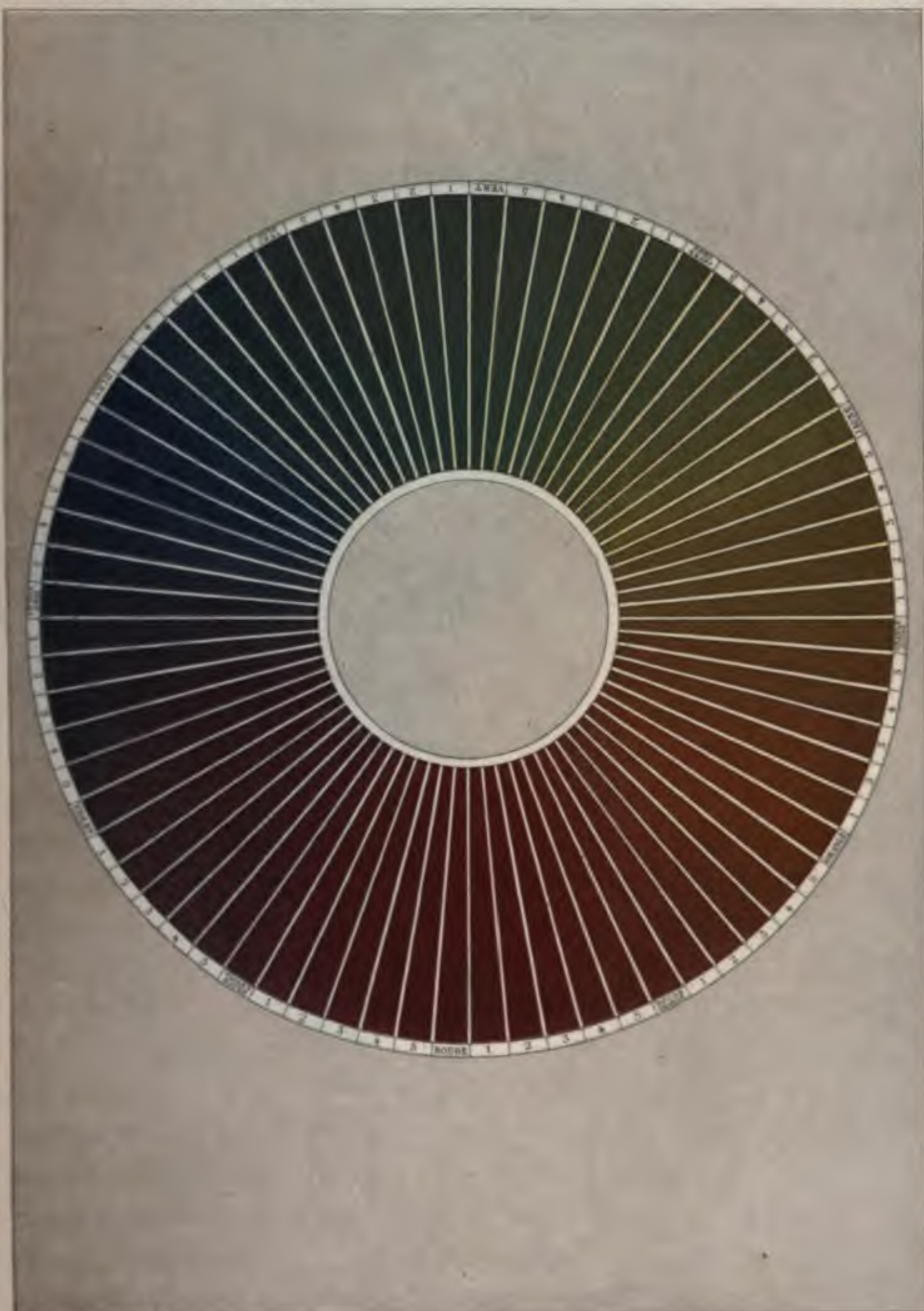
[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]

Les nombres qui [illegible] les [illegible] relations de [illegible] lumière [illegible] quand la [illegible] elle-même [illegible]

[illegible] dire le résultat du mélange de deux couleurs [illegible] on prend deux disques [illegible] l'autre de [illegible] entre les deux une glace sans tain. [illegible] directement; l'autre s'aperçoit au travers [illegible] rente. En outre, le premier est vu [illegible] flexion. Si on le place [illegible] semble superposée au disque vu à travers [illegible] couleurs se trouveront [illegible] aisément de la nuance produite par leur [illegible] ainsi que deux disques [illegible] l'autre par le bleu d'azur de cobalt [illegible] qui prouve que ces couleurs sont complémentaires [illegible]

En résumé, une couleur [illegible] couleur complémentaire ; de plus [illegible] si, à la couleur complémentaire, on [illegible] variables de lumière blanche, le [illegible] du blanc. Mais il ne faut appliquer [illegible] franches, c'est-à-dire à celles qui [illegible] proportion quelconque de noir ; [illegible] parfait, on n'obtiendrait qu'un [illegible]

Enfin, le mélange des couleurs [illegible]



CLASSIFICATION DES COULEURS

d'après le Système de M Chevreul

CERCLE CHROMATIQUE DES COULEURS RABATTUES A 4/10 DE NOIR.

du blanc que s'il n'est pas matériel ; si l'on se sert de couleurs matérielles délayées d'une façon quelconque, ou même à l'état pulvérulent, le mélange ne donnera qu'un gris plus ou moins foncé.

Si les couleurs, tant simples que composées, sont en nombre indéfini, si le mélange en proportions diverses de blanc ou de noir en multiplie encore le nombre, il n'en est pas moins vrai que l'œil n'en peut apprécier distinctement qu'une quantité limitée. Toutefois, s'il était possible de réunir dans une même échelle toutes les nuances de couleurs que nous offre la nature et que nous pouvons distinguer les unes des autres, nous serions étonnés de la richesse et de la magnificence de cette palette : les feuilles et les fleurs dans les plantes, les pelages des animaux, les brillantes couleurs dont sont peintes les plumes des oiseaux, les ailes des papillons et des autres insectes, les nuances des divers minéraux, des coquillages fourniraient les éléments de la série innombrable des couleurs naturelles, et permettraient de passer d'une nuance à la suivante par gradations insensibles. On aurait ainsi une classification des couleurs tirée des objets naturels.

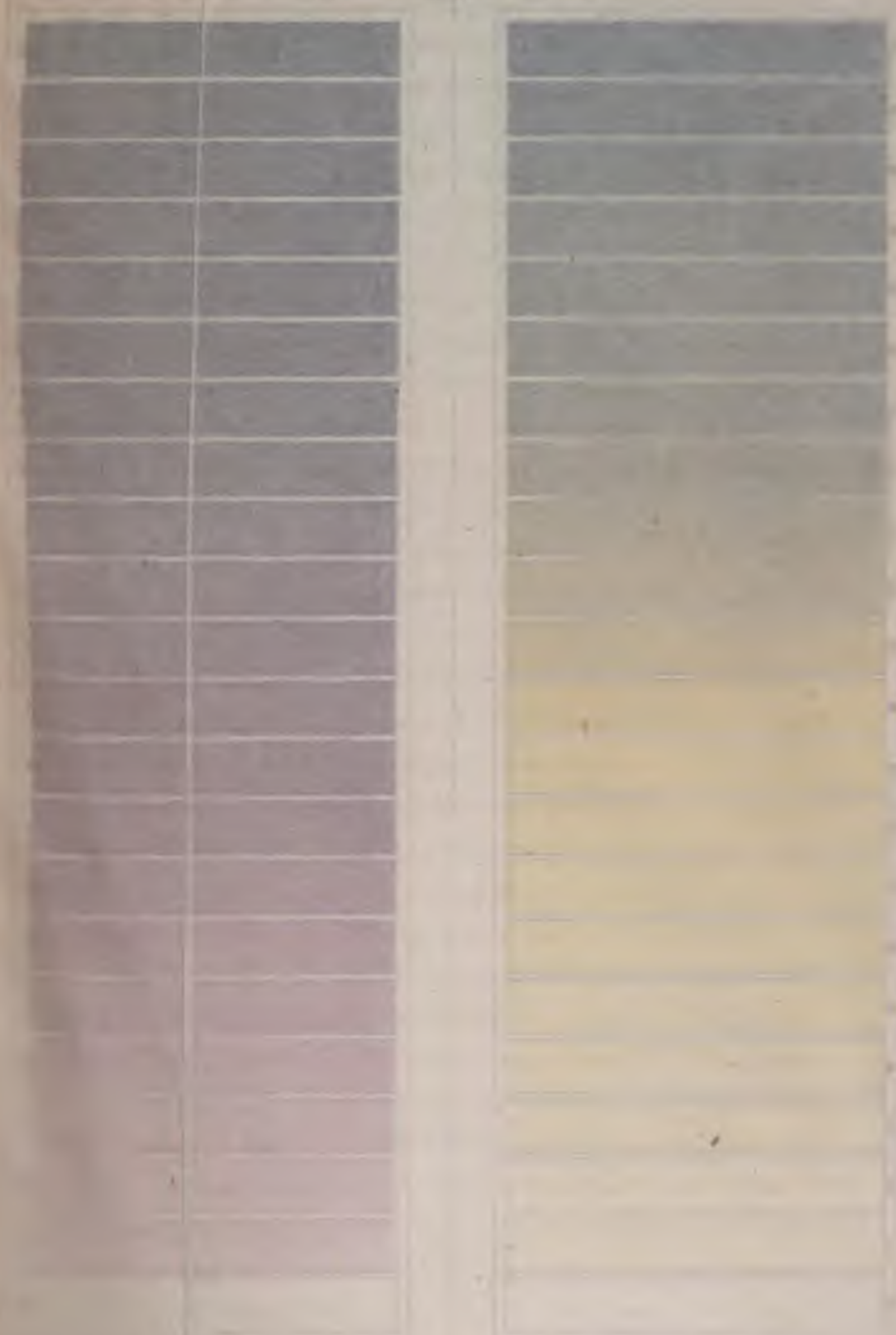
Les couleurs employées dans les arts sont probablement beaucoup plus restreintes : on peut se faire néanmoins une idée de leur nombre par ce fait que les Romains se servaient, dit-on, dans leurs mosaïques de plus de 30 000 teintes. Mais ce nombre même, précisément parce qu'il est considérable, a fait sentir le besoin d'une classification raisonnée des couleurs et de leurs nuances, qui permette de les définir, en rapportant l'une quelconque d'entre elles à un type fixe déterminé une fois pour toutes. Tout le monde sait que, dans l'industrie et dans les arts, la nomenclature des couleurs est fort arbitraire ou, du moins, varie d'un art ou d'une industrie à l'autre : les noms sont empruntés à des objets naturels, minéraux, fleurs, fruits, animaux, mais il n'y a entre eux aucun lien de gradation. C'est pour obvier aux inconvénients qui résultent de cette confusion qu'un savant, célèbre par ses travaux chimi-

la plupart des applications scientifiques et industrielles, et la plupart du temps, elle dépassera les besoins des art: Malheureusement, la reproduction matérielle rigoureuse: exacte de toutes ces couleurs est d'une grande difficulté, n'est pas moins difficile de conserver les types une fois (sont obtenus. Il faudrait reproduire la construction chr(tique de M. Chevreul en couleurs inaltérables, par exemp tableaux émaillés sur porcelaine : les recherches scientifi ne seraient pas moins intéressées que les arts à possédei types fixes, auxquels les couleurs des objets naturels, si vent altérées par le temps, seraient rapportées à l'aide d(méros d'ordre, et de la sorte faciles à reproduire.

§ IV. LES RAIES DU SPECTRE SOLAIRE. ANALYSE SPECTRALE.

Joseph Fraunhofer, né en 1787, à Straubing, petite vil Bavière, était fils d'un simple vitrier. Il fut d'abord ou tailleur de verres, mais, à force de travail et de persévér: il parvint à mériter la réputation du plus savant et du habile opticien de notre siècle. Fraunhofer ne se borna à apporter à la construction des instruments d'optique perfection jusqu'alors inconnue; observateur consomm se servit des appareils qu'il fabriquait, pour faire différ découvertes, parmi lesquelles celle que nous allons dé est à coup sûr une des plus curieuses et des plus féconde conséquences.

Newton, en étudiant les diverses parties du spectre sol n'avait rien pu distinguer qui servît de limite précise au verses couleurs : elles paraissaient se fondre les unes dan autres d'une manière insensible et sans interruption appar Persuadé, par ses expériences, que les rayons colorés (lumière blanche possèdent, de l'extrême rouge à l'ext: violet, tous les degrés possibles de réfrangibilité, il rega chacun de ces rayons comme simple et homogène, et pe



GAMMES CHROMATIQUES

du violet et du jaune

[illegible] scientifiques et industrielles, [illegible] les besoins des [illegible] matérielle rigoureu[illegible] est d'une grande difficul[illegible] conserver les types une foi[illegible] reproduire la construction [illegible] couleurs inaltérables par [illegible] porcelaine ; les recherches scien[illegible] intéressées que les arts à posséd[illegible] types [illegible] les couleurs des objets naturels, [illegible] par le temps, seraient rapportées à l'aide [illegible] et de la sorte faciles à reproduire.

§ IV. [illegible] DU SPECTRE SOLAIRE. ANALYSE [illegible]

[illegible] Fraunhofer, né en 1787, à Straubing, petite [illegible] fils d'un simple vitrier. Il fut d'abord [illegible] de verres, mais, à force de travail et de persév[illegible] parvint à mériter la réputation du plus savant et [illegible] habile opticien de notre siècle. Fraunhofer ne se born[illegible] apporter à la construction des instruments d'optiq[illegible] perfection jusqu'alors inconnue ; observateur conson[illegible] se servit des appareils qu'il fabriquait, pour [illegible] découvertes, parmi lesquelles celle que nous allons [illegible] sûr une des plus curieuses et des plus féco[illegible]

[illegible] en étudiant les diverses parties du spectre [illegible] distinguer qui servît de limite [illegible] paraissaient se fondre les unes [illegible] insensible et sans interruption app[illegible] par ses expériences, que les rayons colorés [illegible] de l'extrême rouge à l'e[illegible] violet, tous les degrés possibles de réfrangibilité, il re[illegible] chacun de ces rayons comme simple et homogène, et [illegible]



GAMMES CHROMATIQUES

du violet et du jaune

que la lumière décomposée par le prisme était étalée d'une manière continue sur toute l'étendue du spectre.

C'est en cherchant à mesurer les indices de réfraction des rayons colorés, et en s'efforçant de trouver dans le spectre des points singuliers propres à lui servir de repère, que Fraunhofer découvrit ce fait capital, que la lumière du spectre solaire n'est pas continue, qu'elle est sillonnée d'une multitude de raies fines et sombres, formant dès lors autant d'interruptions brusques dans la bande lumineuse.

Il employa dans cette expérience, qui exige les précautions les plus délicates, un prisme de flint-glass d'une grande pureté, exempt de stries, sur lequel venait tomber le faisceau solaire après avoir passé par une fente étroite parallèle à l'arête du prisme. Le spectre ainsi obtenu, étant observé avec une lunette qui en grossissait les dimensions, lui donna, au lieu d'une bande continue où les couleurs se fondaient sans interruption, un ruban rayé dans le sens de sa largeur d'une multitude de raies obscures et même totalement noires, très-inégalement réparties dans toute l'étendue du spectre. La distribution de ces raies ne paraissait point d'ailleurs en rapport avec les teintes des couleurs principales.

Fraunhofer varia de toutes les manières possibles son expérience; mais, tant que la source lumineuse employée fut la lumière du Soleil, soit directe, soit réfléchie, les mêmes lignes sombres apparurent toujours, conservant entre elles les mêmes rapports d'ordre et d'intensité. Si, au lieu d'un prisme de flint-glass, on se sert d'un prisme d'une autre substance solide ou liquide, les distances seules des raies varient, mais d'ailleurs elles occupent toujours les mêmes positions relativement aux couleurs du spectre.

L'illustre opticien de Munich étudia avec un soin infini ce remarquable phénomène; il fixa avec une précision extrême les positions de 580 raies obscures, et, pour servir de points de repère et de comparaison, il distingua dans ce nombre huit raies principales, qu'il désigna par les premières lettres de

l'alphabet. Le spectre solaire de la planche IV donne la p
tion de ces raies, telles qu'on les obtient avec un prisme r
pli de sulfure de carbone. Comme on peut s'en assurer,
raies A, B, C, se trouvent toutes les trois dans le rouge, la
mière à l'extrémite du spectre, la seconde au milieu du ro
et la troisième à peu de distance de l'orangé. La raie do
D forme à peu près la limite de l'orangé du côté du vert; l
au milieu de cette dernière couleur; F au milieu du bleu
et la double raie H sont l'une à la fin de l'indigo vers le b
l'autre à la fin du violet.

Depuis 1817, époque à laquelle Fraunhofer découvri
raies qui portent son nom[1], de nouvelles lignes sombres
été observées, et l'on évalue aujourd'hui à plus de 2000 c
dont la position a été déterminée. On peut se faire une
de cette multitude de stries par l'examen de la figure 238,
reproduit une portion du spectre solaire comprise entre
raies principales D et E. Brewster, un des physiciens qu
sont le plus occupés de ces recherches, outre les précaut
indispensables pour obtenir un spectre bien net et bien
augmentait la sensibilité de sa vue à l'aide du gaz ammo
dont l'action dissolvante détruit le voile fluide qui recouvr
surface de l'œil.

Fraunhofer ne se borna point à étudier les lignes qui r
pent la continuité de la lumière dans le spectre solaire. Il
pliqua ses belles méthodes d'observation aux spectres
autres sources de lumière. Et d'abord, comme on pouva
pressentir, il trouva les mêmes raies dans les sources lu
neuses qui renvoient par réflexion la lumière du Soleil
lumière des nuages ou du ciel pur, celles de la Lune et
planètes. Les raies y sont, à la vérité, d'une intensité m
dre. En observant les étoiles les plus brillantes, par exe
le spectre de Sirius, il trouva que ce spectre est aussi stri

1. En 1802, le physicien Wollaston avait signalé déjà quelques-une des
du spectre. Fraunhofer ignorait cette observation, et a mérité, par ses é
approfondies, d'être regardé comme le véritable auteur de la découverte.



Fig. 238. — Un fragment du spectre solaire.

raies sombres; mais ces raies, beaucoup moins nombreuses, ne sont pas distribuées de la même façon que dans le spectre solaire; d'ailleurs, elles changent aussi d'une étoile à une autre. Enfin, il appliqua la même méthode à la lumière électrique: au lieu de raies sombres il vit dans le spectre de cette lumière un certain nombre de raies lumineuses.

Telles sont les célèbres expériences qui ont servi de point de départ à une série de brillantes découvertes, dont l'ensemble constitue aujourd'hui une des branches les plus importantes l'optique et, pour la chimie, la plus ingénieuse et la plus délicate méthode d'analyse. Essayons de donner une idée de cette méthode, connue sous le nom d'*analyse spectrale*.

Le spectre solaire et les spectres stellaires sont, comm vient de le voir, sillonnés de raies sombres qui indiquent interruptions dans l'émission de la lumière et prouvent, trairement à ce qu'on avait cru d'abord, qu'il n'y a pas, ces sources, des rayons possédant tous les degrés possible réfrangibilité. Le contraire a lieu pour les spectres des incandescents à l'état solide ou à l'état liquide : les spe de leurs lumières sont continus.

D'autres sources lumineuses donnent des résultats c rents. Quand on introduit dans une flamme artificielle, exemple dans celle d'un bec de gaz ou d'une lampe à al certaines substances métalliques que la haute températu la source réduit à l'état de vapeurs, on n'observe plus de tres continus, mais quelques raies brillantes séparées p larges intervalles obscurs. C'est ce qu'avait déjà rem Fraunhofer.

Depuis, le même fait a été étudié sous toutes ses faces diverses méthodes. On a reconnu que les raies brillante vapeurs métalliques varient en nombre et en position su la nature du métal; leur intensité varie aussi avec la tem ture; mais, de même que les raies noires du spectre so elles occupent toujours les mêmes positions relatives, d a déterminé la concordance avec quelques-unes des mières.

Pour étudier les spectres de cette nature, les physicien ploient des appareils qu'ils nomment *spectroscopes*. La 239 représente l'un de ces instruments réduit à ses principales. La flamme d'une lampe à gaz est placée sur d'une lunette dans laquelle la lumière pénètre par une étroite, puis va rencontrer un prisme posé sur une plate- circulaire. Le spectre qui résulte du passage de la lum travers le milieu réfringent va former au foyer d'une aut nette une image qu'on examine en mettant l'œil à l'o de celle-ci.

Pour obtenir le spectre d'un métal, par exemple ce

sodium, on introduit dans la flamme de la lampe un fil de platine imprégné d'une dissolution concentrée d'un sel dont ce métal forme la base, de sel marin (chlorure de sodium) je suppose. Aussitôt on voit apparaître une raie jaune d'une grande intensité et aux contours très-nets. C'est la raie unique du spectre du sodium, telle qu'on peut la voir dans la planche IV.

Le lithium donne deux raies principales, l'une jaune d'un



Fig. 239. — Spectroscope horizontal.

faible éclat, l'autre rouge et brillante; le potassium fournit deux raies caractéristiques, une rouge, une violette; d'autres raies jaunes et vertes les accompagnent. Le calcium donne une raie verte très-vive, une orangée, une bleue. Le strontium, huit raies, dont six sont rouges, une orangée, une bleue; le baryum, deux raies vertes; le thallium, une raie unique, de couleur verte et remarquable par son éclat.

Un grand nombre de corps simples ont été étudiés de cette

manière, les raies brillantes de leurs spectres reconnu fixées de position, de sorte qu'il suffit d'examiner et de parer aux résultats dont nous parlons le spectre d'une fla pour qu'on puisse en déduire la nature des vapeurs mé ques qui s'y trouvent en dissolution. De là, on le comp une nouvelle méthode d'analyse pour la chimie, métho délicate et si sensible que la millionième partie d'un gramme de sodium suffit pour qu'on voie aussitôt appa la raie jaune caractéristique du spectre de ce métal. Deu mistes et physiciens allemands, MM. Kirchhoff et Bunse porté l'analyse spectrale au dernier degré de précision. prends, dit M. Bunsen, un mélange des chlorures des m alcalins et alcalino-terreux, sodium, potassium, lithium ryum, strontium et calcium, contenant au plus un cen lième de milligramme de chacune de ces substances; je ce mélange à la flamme, et j'observe le résultat. D'ab ligne jaune intense du sodium apparaît sur le fond d'un s continu très-pâle; quand elle commence à être moins se et que le sel marin s'est volatilisé, les faibles lignes du sium apparaissent; elles sont suivies de la ligne rouge thium, qui disparaît bientôt, tandis que les raies vertes ryum apparaissent dans toute leur intensité. Les sels de s de potassium, de lithium, de baryum sont alors entiè volatilisés; quelques instants après, les lignes du calc du strontium se montrent, comme si un voile se dissi atteignent peu à peu leur forme et leur éclat caractéristi

A l'aide de l'analyse spectrale, on a constaté la pr du sodium dans l'air et dans les poussières qu'il tient pension. La sensibilité de réaction de ce métal est si for les observateurs du spectroscope sont obligés de s'ento toutes sortes de précautions pour que cette réaction ne nifeste pas aussitôt par la présence de la raie jaune spectre : il suffit d'épousseter un livre dans le voisin l'instrument, pour que cette raie se montre aussitôt.

Quatre nouveaux métaux ont été découverts par cet



SPECTRES

de diverses Sources lumineuses.

SOLAIRE, STELLAIRES, MÉTALLIQUES, GAZEUSES, ÉLECTRIQUES.

[illegible] de leurs spectres recon[illegible]
[illegible] qu'il suffit d'examiner et d[illegible]
[illegible] partant le spectre d'une [illegible]
[illegible] la nature des vapeurs [illegible]
[illegible] De là, on le so[illegible]
[illegible] d'analyse pour la chimie, mé[illegible]
[illegible] millionième partie d'[illegible]
[illegible] qu'on voie aussitôt ap[illegible]
[illegible] du spectre de ce métal. D[illegible]
[illegible] MM. Kirchhoff et Bun[illegible]
[illegible] dernier degré de précis[illegible]
[illegible] un mélange des chlorures [illegible]
[illegible] sodium, potassium, lith[illegible]
[illegible] contenant au plus un [illegible]
[illegible] de chacune de ces substances; [illegible]
[illegible], et j'observe le résultat. [illegible]
[illegible] sodium apparaît sur le fond d'[illegible]
[illegible] elle commence à être moins [illegible]
[illegible] volatilisé, les faibles lignes [illegible]
[illegible] ; elles sont suivies de la ligne rou[illegible]
[illegible] qui disparaît bientôt, tandis que les raies [illegible]
[illegible] dans toute leur intensité. Les sels d[illegible]
[illegible], de lithium, de baryum sont alors [illegible]
[illegible] ; quelques [illegible] après, les lignes du [illegible]
du strontium [illegible] comme si un voile [illegible]
[illegible] peu à peu leur forme et leur éclat caractér[illegible]

[illegible] l'analyse spectrale, on a constaté la [illegible]
[illegible] dans l'air et dans les poussières qu'il tien[illegible]
[illegible] La sensibilité de réaction de ce métal est si [illegible]
[illegible] du spectroscope sont obligés de s'en[illegible]
[illegible] de précautions pour que cette réaction [illegible]
[illegible] par la présence de la raie jaun[illegible]
[illegible] un livre dans le vo[illegible]
l'instrument, [illegible] cette raie se montre aussitôt [illegible]

Quatre [illegible] métaux ont été découverts par [illegible]

thode : les deux premiers, le cæsium et le rubidium par MM. Bunsen et Kirchhoff, le troisième, le thallium, par M. Crookes et M. Lamy, le quatrième, l'indium, par MM. Reich et Richter. Le nom du cæsium lui vient de deux raies bleues, le rubidium, des raies rouges qui caractérisent les spectres de ces métaux; le nom du thallium rappelle la raie verte caractéristique de ce métal, et celui de l'indium une raie bleue située dans l'indigo.

Jusque-là le spectroscope, quelque admirables que soient les progrès qu'il avait fait faire à l'analyse chimique, ne sortait pas du domaine des laboratoires : il permettait d'analyser, de reconnaître des substances terrestres que nous pouvons voir ou toucher, indiquant même la présence de corps jusqu'alors inconnus. Mais ce n'est pas à cela que devait se borner sa puissance. Grâce à lui, on est allé plus loin; on a pu aborder et résoudre en partie un problème qui paraissait inaccessible aux investigations humaines : étudier la composition chimique des astres, celles du Soleil, celles des étoiles, de ces soleils si prodigieusement éloignés de nous, des nébuleuses que les télescopes nous montrent plongées dans les abîmes de l'éther, à de telles distances que l'imagination peut à peine en sonder la profondeur.

Voici, en quelques lignes, les expériences qui ont conduit à un si merveilleux résultat.

Plaçons la flamme d'un bec de gaz en avant de la lunette du spectroscope, et affaiblissons-la au point de n'avoir plus qu'une flamme bleuâtre, à peine sensible. En cet état, elle ne fournit pas de spectre; il y a obscurité complète derrière le prisme. Mais qu'on introduise un sel métallique dans la flamme, un peu de sel marin, par exemple, aussitôt apparaît la raie jaune du sodium : c'est ce que nous venons de voir tout à l'heure.

Si, en même temps, et dans le même prisme, on introduit un rayon de soleil, de façon que le spectre du sodium et le spectre solaire se superposent, on remarquera une coïnci-

dence parfaite dans la position de la raie jaune du sodi
de la double raie sombre D de Fraunhofer.

Maintenant, à la lumière du Soleil substituons la lu
intense connue sous le nom de lumière de Drummond,
l'obtient en brûlant un fragment de chaux dans un bec
mélangé d'oxygène; — le spectre de cette lumière, vu
ment, offre un vif éclat et une continuité parfaite : il n
tient aucune des lignes sombres du spectre solaire. Mai
fait en sorte qu'il recouvre exactement le spectre du s
en interposant la lumière Drummond entre le prism
flamme sodée, aussitôt la ligne jaune du sodium dispa
fait place à une ligne obscure, occupant précisément la
position que la raie brillante.

C'est ce phénomène que M. Kirchhoff a désigné sous l
de *renversement du spectre des flammes*. Il a été const
un assez grand nombre de spectres métalliques. « Si l'
arriver, dit-il, un rayon solaire au travers d'une flam
lithium, on voit apparaître dans le spectre, à la plac
raie rouge, une raie obscure qui rivalise par sa nette
les raies de Fraunhofer les plus caractéristiques, et qui
raît lorsqu'on enlève la flamme de lithium. Le renver
des raies brillantes des autres métaux s'obtient moins
ment; cependant nous avons été assez heureux, M. Bu
moi, pour renverser les raies les plus brillantes du pot
du strontium, du calcium et du baryum.... »

Maintenant, quelle conséquence tire-t-on de ce fait
lier? C'est que les vapeurs métalliques, douées de la p
d'émettre en abondance certains rayons colorés, de pré
aux autres, absorbent au contraire ces mêmes rayons
d'une source lumineuse et traversant la première
Ainsi, la lumière du sodium, qui émet les rayons
absorbe précisément les rayons jaunes de la lumière
mond, à leur passage dans la première. De là, cette rai
qui vient se placer, dans le spectre continu, à la plac
cupait la raie brillante du sodium.

Si cette absorption est un fait général, il faut en conclure que les raies noires, observées dans le spectre solaire, indiquent le renversement d'autant de raies brillantes dues aux vapeurs métalliques de son atmosphère. Cette atmosphère joue, pour nous, le rôle du brûleur obscur de Bunsen, et la vive lumière du corps du Soleil, celui de la lumière Drummond dans la même expérience.

En étudiant à ce point de vue les raies noires du spectre solaire, Bunsen et Kirchhoff ont pu constater la coïncidence d'un grand nombre d'entre elles avec les raies brillantes de certains métaux. Par exemple, les 70 lignes brillantes du fer, variées de couleur, de largeur et d'intensité coïncident, sous tous ces points de vue et d'une façon si précise avec 70 raies sombres du Soleil, qu'il est impossible de douter qu'il y ait dans l'atmosphère solaire du fer à l'état de vapeur métallique. Dans la figure 238, on voit un certain nombre de ces raies, marquées Fe. Les mêmes savants ont reconnu la présence de sept autres corps simples, l'hydrogène, le cuivre, le zinc, le chrôme, le nickel, le magnésium, le baryum, le calcium et le sodium ; et il est probable qu'à cette liste il faut joindre le cobalt, le strontium et le cadmium.

De l'absence des raies caractéristiques des autres métaux, tels que l'or, l'argent, le platine, etc., dans le spectre solaire, on avait cru d'abord pouvoir conclure que ces corps ne se trouvent pas dans le Soleil, au moins dans les couches extérieures qui forment son atmosphère. Mais cette conclusion est trop absolue, ainsi qu'il résulte de nouvelles recherches dues à M. Mitscherlich. Suivant ce physicien, il arrive que la présence de certaines substances dans une flamme a pour effet d'empêcher de se produire les spectres d'autres substances, d'éteindre leurs raies principales : ainsi, quand on imprègne de chlorure de cuivre et d'ammonium la flamme du chlorure de strontium, la raie bleue de ce dernier métal disparaît.

N'est-ce pas chose merveilleuse, que cette propriété de la lumière d'accuser avec une sensibilité si grande la composi-

tion chimique des corps d'où elle émane, de conserver, a un trajet de 37 millions de lieues, les traces de l'absorptic tel ou tel rayon coloré, indice certain de l'action des simples en suspension dans une atmosphère que les ast mes ne faisaient que soupçonner, et dont l'existence se t ainsi confirmée? L'analyse spectrale, appliquée aux ét aux planètes, aux comètes, aux nébuleuses, fournit des cations précieuses sur la constitution intime de ces co résout des problèmes que les plus puissants instruments tique n'auraient sans doute jamais permis d'aborder. ainsi que les sciences se prêtent un mutuel concours, e tout progrès réalisé par l'une d'elles est presque sûre pour les autres, le point de départ de nouvelles découv

§ V. LES RADIATIONS SOLAIRES, CALORIFIQUES, LUMINEUSES ET CHIMIQUES.

Les diverses parties du spectre solaire ne se distingue seulement par l'inégale réfrangibilité des rayons qui le duisent, par les nuances de leurs couleurs, mais aussi vivacité plus ou moins grande de leur éclat, et par leur échauffante ou calorifique, ainsi que par le pouvoir q ont de modifier, à des degrés divers, certaines substan point de vue chimique.

Quand on compare, dans le même spectre, les int lumineuses des sept couleurs principales, on reconna médiatement que c'est dans le jaune que se trouve la la plus brillante. A partir de ce point, l'éclat diminue, aille soit du côté de l'extrême rouge, soit du côté du De plus, on voit que les couleurs peuvent se ranger na lement en deux classes : la première comprenant les co *lumineuses*, le rouge, le jaune, le vert; la seconde, le leurs *sombres*, le bleu, l'indigo, le violet, auxquelles o joindre les rayons de l'extrémité rouge. Une expérienc

simple permet de juger de la différence qui existe entre les pouvoirs éclairants des diverses couleurs : qu'on prenne les pages d'un livre, et qu'on reçoive le spectre sur la partie imprimée du papier, on verra que les caractères seront aisément lisibles dans l'orangé, le jaune et le vert, tandis qu'on aura de la peine à déchiffrer ceux qui reçoivent les autres couleurs.

D'après Fraunhofer, qui a étudié photométriquement les intensités lumineuses des couleurs du spectre, c'est entre les raies D et E, à la limite du jaune, que se trouve le maximum d'éclat; mais ce point est plus rapproché de D, et sa distance à cette dernière ligne est environ la 10me partie de l'intervalle total DE. Des méthodes plus précises ont permis d'apprécier numériquement les pouvoirs éclairants du spectre, aux points où il est coupé par les huit principales raies de Fraunhofer. En évaluant à 1000 l'éclat maximum, voici quelles sont les intensités lumineuses dont il s'agit :

Couleurs.	Intensités lumineuses.	Raies.
Extrême rouge	insensible.	A
Rouge	32.	B
Rouge	94.	C
Orangé.	640.	D
Jaune	1000.	
Vert	480.	E
Bleu	170.	F
Indigo	31.	G
Extrême violet	6.	H

On s'est demandé, il y a longtemps, si la chaleur des rayons solaires se distribuait également dans toute l'étendue du spectre, ou si, au contraire, les divers rayons colorés, outre leur différence d'intensité lumineuse, possédaient aussi des pouvoirs calorifiques inégaux. Des expériences dues à Rochon firent croire d'abord que les rayons les plus lumineux étaient aussi les plus chauds, de sorte que le maximum eût été dans le jaune; mais bientôt d'autres physiciens assurèrent que ce maximum était dans le rouge, ou à l'extrémité

du rouge. Selon Seebeck (1828), toutes ces opinions vraies, parce que la chaleur transmise par les rayons co se trouvant inégalement absorbée suivant la nature du pri la position du maximum calorifique doit dépendre de la stance de ce dernier. Et, en effet, ce physicien fit voir qu rayons calorifiques les plus intenses sont ceux du jaun l'orangé, du rouge ou de l'extrême rouge, suivant qu dispersé la lumière solaire à l'aide de prismes formés av l'eau, de l'acide sulfurique, du verre ordinaire ou du glass anglais. Comme le sel gemme absorbe peu ou po chaleur, que celle-ci soit obscure ou lumineuse, c'est av prisme de cette substance qu'on peut le mieux compar pouvoirs calorifiques des divers rayons colorés. En op de cette façon, Melloni a prouvé que la température d rayons va en s'élevant du violet au rouge; c'est au-de rouge, dans le prolongement du spectre, que se trou maximum, à une distance de la limite extrême du rouge à celle qui existe entre cette limite et le jaune. Au de chaleur décroît, mais elle est encore sensible, quand rive à une distance du rouge égale à toute l'étendue du tre lumineux.

Ce résultat remarquable acquiert un nouveau degré portance, quand on étudie sous un autre point de vue l' des rayons solaires. Tout le monde connaît l'influence lumière du soleil sur les couleurs matérielles, quand ce leurs sont appliquées soit sur des étoffes, soit sur du p du bois et diverses autres substances organiques. Les ri de tenture pâlissent à la lumière du jour, les toiles écr teinte jaunâtre blanchissent quand on les expose au sol sait aujourd'hui combien la lumière est nécessaire au c épanouissement, à la santé, à la vie même des végétaux animaux. Or, ces influences multiples sur lesquelles no rons l'occasion de revenir ailleurs, consistent, en de analyse, en une suite d'actions chimiques, en des déc sitions ou combinaisons de substances. Du chlore et d

drogène qui, dans l'obscurité, n'ont aucune action l'un sur l'autre, exposés à la lumière se combinent, et forment de l'acide chlorhydrique. Si le flacon qui les contient est placé dans un lieu éclairé par la lumière diffuse du jour, la combinaison s'effectue lentement; aux rayons solaires, elle se fait subitement et avec explosion. La lumière décompose les sels d'or, d'argent, de platine. L'héliographie découverte par Niepce et Daguerre, et tous les procédés actuels de la photographie sont basés sur l'action chimique des rayons lumineux provenant soit du Soleil, soit de la Lune, soit d'autres sources d'une intensité suffisante. Nous décrirons ces procédés plus tard : il suffit en ce moment de constater les phénomènes.

La même question se présente ici que pour les pouvoirs éclairants et calorifiques : il s'agit de savoir si les différentes régions du spectre solaire sont douées de la même faculté au point de vue chimique, ou si leur efficacité varie de l'une à l'autre. Or, Scheele qui, dès 1770, avait constaté l'action de la lumière sur le chlorure d'argent, reconnut aussi que les rayons colorés du spectre agissent inégalement pour produire cette décomposition. On découvrit ensuite, non-seulement que les radiations chimiques augmentent d'intensité du rouge au violet, au point que le chlorure en question noircit en quelques minutes, quand il reçoit les rayons concentrés de la partie violette du spectre; tandis qu'il faut plusieurs heures, s'il reçoit les rayons du vert au rouge; mais qu'au delà du violet extrême, dans la partie obscure du spectre, l'action chimique continue à une distance considérable de la partie lumineuse. L'intensité de la radiation chimique qui varie, pour une substance, suivant la position des rayons dans le spectre, n'atteint pas son maximum au même point pour des substances différentes. Ce maximum n'est pas le même pour les sels d'argent que pour les sels d'or, pour ceux-ci que pour les sels de potasse.

Phénomène digne de remarque : le spectre qu'on peut appeler chimique, pour le distinguer du spectre lumineux et

du spectre calorifique, présente des raies comme le pre
de ceux-ci. On voit, dans les parties noircies du chlo
d'argent, des lignes blanches qui indiquent l'interruptio
l'action chimique, et leur position coïncide précisément
les raies de Fraunhofer. Mais au delà du violet existent d
tres raies qui naturellement n'en ont pas de corresponda
dans le spectre lumineux[1].

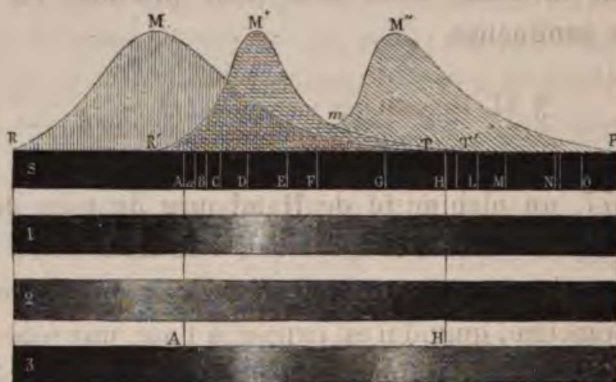


Fig. 240. — Spectres calorifiques, lumineux et chimiques de la lumière solaire; 1. lumineux, RMT; 2. Spectre calorifique R'M'T'; 3. Spectre chimique R'M'M''P.

Ainsi le spectre solaire est plus complet qu'on aurai le croire d'abord, en n'étudiant que l'impression pro sur l'œil. Il semble qu'il est formé de trois spectres superp l'un donnant la lumière et les couleurs (fig. 240, 1); un a dont l'action est sensible au thermomètre, nous révèl propriétés échauffantes ou calorifiques des rayons sol (fig. 240, 2); un troisième enfin (fig. 240, 3) nous app comment varie leur activité chimique. Mais existe-t-il en trois espèces de rayons, ainsi qu'on l'avait d'abord supp Des expériences délicates, parmi lesquelles nous ne fa que citer celle qui accuse l'identité des raies du spectre l

1. Cependant les rayons plus réfrangibles que le violet ne sont pas con ment invisibles. D'après J. Herschel, les rayons ultra-violets, en agissant rétine, donnent une nuance nommée par lui *gris-lavande*. Les raies d partie du spectre dont M. E. Becquerel a démontré l'existence, ont été nues à la vue par MM. Mathiessen, Helmholtz et Esselbach.

neux et de celles du spectre chimique, démontrent qu'il y a identité entre les diverses radiations. Ce sont les mêmes rayons qui produisent, ici les diverses couleurs et leurs intensités lumineuses variables, là les degrés de chaleur inégalement distribués, là encore les combinaisons et décompositions chimiques. Seulement, tel rayon, doué d'un pouvoir calorifique ou chimique considérable, n'exerce pas sur notre rétine une influence assez forte pour produire en nous la sensation lumineuse.

§ VI. PHÉNOMÈNES DE PHOSPHORESCENCE.

En 1677, un alchimiste de Hambourg du nom de Brandt découvrit, par un procédé qu'il tint d'abord secret[1], un nouveau corps doué, entre autres propriétés singulières, de la faculté d'émettre, quand il est exposé à l'air, une légère fumée qui se renouvelle continuellement : dans l'obscurité cette vapeur est lumineuse. De là, le nom de *phosphore* (de φῶς lumière, φορος qui porte) appliqué à cette substance, qui est un des soixante-six corps simples actuellement connus. Si l'on trace, avec un bâton de phosphore, des caractères quelconques sur un mur, ils apparaissent comme des traits lumineux dans l'obscurité, et ne cessent de luire qu'après la disparition complète, par combustion lente ou évaporation, de la matière phosphorée.

Bien avant la découverte de ce corps, on donnait le nom de phosphores à toutes les substances qui émettent, comme lui, de la lumière sans accompagnement de chaleur sensible. Tels sont les bois que l'humidité a fait tomber en décomposition, les poissons de mer morts, mais non encore putréfiés, dont la lueur se communique à l'eau elle-même quand on les agite pendant quelque temps, et enfin un grand nombre de sub-

1. Peu d'années après Brandt, Kunckel trouva le moyen d'obtenir le phosphore. Un siècle plus tard, en 1769, Scheele montra qu'il est contenu en grande abondance dans les os de l'homme et des animaux.

stances minérales, quand on les soumet à des chocs ou à frottements mécaniques, ou qu'elles ont été exposées rayons solaires.

C'est à cette émission de lumière, spontanée ou artificie que les physiciens donnent le nom de *phosphorescence.*

La phosphorescence n'est pas particulière aux mati inorganiques ou privées de vie. Quand, par une chaude so de juin ou de juillet, nous nous promenons dans la campag il n'est pas rare de voir dans l'herbe et sous les buissons multitude de petites lueurs qui brillent comme autant d'éto terrestres : ce sont les lampyres ou *vers luisants*, genre coléoptères dont la larve, comme l'insecte parfait, mais à moindre degré, jouit de la propriété d'émettre une lum d'un bleu verdâtre. Les *fulgores porte-lanterne* de la Guy et les *cucuyos* du Mexique et du Brésil brillent, pendan nuit, d'une lumière assez vive pour qu'il soit possible de avec leur seul secours. Certaines fleurs, comme les fleurs souci, de la capucine, de la rose d'Inde, ont été considé comme phosphorescentes, mais s'il paraît aujourd'hui pro qu'on s'est trompé à leur égard, il reste certain qu'une qu zaine de plantes phanérogames et huit ou neuf cryptoga ont la propriété d'émettre de la lumière ; mais c'est seulem le soir, après une journée où ces végétaux ont pu recevoi lumière du soleil, de sorte que l'insolation paraît être, p eux, une condition essentielle à la phosphorescence. La pl phorescence de la mer est produite par des myriades d'anin cules qui, comme les lampyres et les fulgores, émettent lumière assez vive pour donner aux flots l'apparence de na embrasées. Ce sont tantôt des infusoires, tantôt des médu des astéries, etc., qui répandent, les unes une lumière bleu les autres des lueurs rouges ou vertes, ou même comm quent à l'eau de la mer une teinte blanchâtre qui lui fait d ner par les marins les noms de *mer de neige* ou de *mer de*

Les coquilles d'huîtres calcinées deviennent lumineu quand elles viennent d'être exposées à la lumière du Sol

c'est au sulfure de calcium qu'est due cette propriété, qui appartient aussi aux sulfures de baryum et de strontium[1].

La phosphorescence peut encore être développée dans un grand nombre de substances par des actions mécaniques ou chimiques. Qui ne s'est aperçu, en cassant du sucre, des lueurs qui se dégagent au moment du choc? On obtient des effets semblables en frottant énergiquement l'un contre l'autre deux morceaux de quartz, de craie, de chlorure de chaux, ou en détachant par le clivage des lamelles de mica.

L'élévation de température détermine aussi la phosphorescence. Le spath fluor, le diamant et d'autres pierres précieuses, la craie, les sulfates de potasse et de quinine dégagent de la lumière, quand on les met en contact avec des corps chauds. Nous verrons plus tard que l'électricité est susceptible de reproduire les mêmes effets sur les corps mauvais conducteurs.

Ainsi, voilà toute une série de phénomènes dans lesquels la production de la lumière n'est ni le résultat d'une combustion vive à une haute température, ni celui d'une illumination rapide qui disparaît aussitôt que la source cesse d'être en présence de l'objet éclairé. Tous les corps que nous venons de passer en revue et que des circonstances particulières rendent phosphorescents acquièrent, pour un temps limité, il est vrai, mais souvent assez considérable, la propriété d'être lumineux par eux-mêmes, d'émettre de la lumière sensible dans l'obscurité, assez forte pour éclairer les objets voisins.

La phosphorescence paraît due à des causes multiples : dans les êtres organisés et vivants, le mode de production de la lumière est à peu près inconnu. On sait seulement que la volonté de l'animal joue un certain rôle, qu'une température

1. Canton, physicien anglais, a découvert, en 1764, la phosphorescence des huîtres calcinées ; voilà pourquoi l'on nomme le sulfure de calcium *phosphore de Canton*. C'est à un ouvrier de Bologne, V. Calciarolo, qu'est due la découverte de la phosphorescence du sulfate de baryte calciné. De là le nom de *phosphore de Bologne* donné au sulfure de baryum.

modérée est nécessaire au dégagement de la lumière, ai que la présence de l'oxygène. Un froid trop vif, une chal un peu forte la font également disparaître. Dans le phosphor bois pourri, les poissons morts, la production de la lumière due sans doute à une action chimique, à une combustion le dans le vide en effet, toute phosphorescence cesse. Enfin résulte des faits exposés plus haut, que l'insolation, l'élévat de température, l'électricité, et des actions mécaniques où lectricité et la chaleur jouent sans doute un rôle, sont d beaucoup de cas, des conditions favorables au développem de la phosphorescence. Dans ces derniers temps, ce mode gulier de production de la lumière a été l'objet d'études intéressantes, dues à MM. Biot, Matteucci, et principalem à M. Edmond Becquerel. Nous allons les résumer rapidem

Il a d'abord été reconnu que la phosphorescence est propriété que peuvent acquérir momentanément un gr nombre de corps, surtout à l'état solide et à l'état gazeux papier, l'ambre, la soie, et une multitude d'autres mati d'origine organique : les oxydes et les sels des métaux alcal des métaux terreux, et de l'uranium ; un grand nombre gaz. Mais ni les autres métaux, ni leurs composés, ni auc sorte de liquide n'a pu jusqu'ici manifester la moindre t de ce phénomène.

Les teintes de la lueur phosphorescente varient selon nature du corps : ainsi les pierres précieuses émettent lueur jaune ou bleue. Les sulfures de strontium, de bary de calcium, donnent toutes les nuances du spectre, depui rouge jusqu'au violet. Mais un fait singulier, mis en évide par M. E. Becquerel, c'est que la teinte et la vivacité d lueur ne dépendent pas seulement de la température, n aussi du mode de production des sulfures, et ce qui est singulier encore, de l'état moléculaire des sels d'où ils ont tirés. Ainsi, ayant pris divers carbonates de chaux, du sp de la craie, etc., et les ayant traités par le soufre, il obtint sulfures de calcium qui, exposés au soleil, devinrent ph

phorescents, et donnèrent dans l'obscurité les teintes suivantes :

		Teinte de la lueur.
Sulfures de calcium provenant de	Spath	Jaune orangé.
	Craie	Jaune.
	Chaux de Spath.	Vert.
	Arragonite fibreuse	Vert.
	Marbre	Violet rose.
	Arragonite de Vertaison . .	Violet rose.

« Si l'on veut me permettre une comparaison, dit M. E. Becquerel à l'occasion de ces faits, on pourrait dire que ces derniers corps, par rapport aux effets lumineux, sont analogues aux cordes sonores auxquelles on fait rendre différents sons suivant leur état de tension. »

L'élévation de la température, nous l'avons déjà dit, accélère la phosphorescence ; mais aussi elle la fait dépenser plus vite : la lueur obtenue dure moins longtemps. Elle a aussi pour effet de modifier les teintes ; ainsi le sulfure de strontium, bleu à la température ordinaire, passe au violet bleu, au bleu clair, au vert, au jaune, et enfin à l'orangé, quand on élève progressivement sa température de 20 degrés au-dessous de zéro à 150 degrés au-dessus.

Il était d'un grand intérêt d'étudier la manière dont les diverses radiations du spectre agissent sur les corps pour déterminer leur phosphorescence, depuis les rayons chimiques situés dans la partie obscure du spectre au delà du violet, jusqu'aux rayons calorifiques de la partie au delà du rouge. Pour cela, on a projeté le spectre sur des bandes recouvertes de diverses substances phosphorescentes, puis on a examiné dans l'obscurité les effets lumineux produits à des distances différentes, c'est-à-dire dans les régions que déterminent les raies prismatiques. On a vu ainsi quels étaient les rayons qui produisaient les effets lumineux les plus intenses. On a trouvé que le maximum d'action dépend des corps impressionnés; mais, dans tous les cas, ce sont toujours les rayons chimiques les plus voisins du violet, les plus réfran-

gibles, par conséquent, qui produisent la phophorescei les rayons calorifiques ne l'excitent point; mais ils doués de la propriété de continuer l'action des ra chimiques. Ces résultats expliquent à merveille la fi action de la flamme des bougies ou du gaz pour produir phosphorescence des corps, et au contraire l'efficacité c lumière électrique : cette dernière source abonde en ra chimiques ou ultra-violets, tandis que les premières, ri en rayons de chaleur, sont très-pauvres, au contraire rayons chimiques. La lumière si vive du magnésium rive comme l'a montré M. Le Roux, avec la lumière électriqu suffit d'allumer un fil de ce métal en présence d'un tube fermant, par exemple, du sulfure de calcium, pour obtenii phosphorescence prolongée de cette substance, ainsi qu' constate en portant le tube dans l'obscurité.

M. Edmond Becquerel a imaginé, pour l'étude de ces ph mènes, un instrument qu'il nomme *phosphoroscope* (fig. : En voici la description sommaire. Deux disques n sont percés chacun de quatre ouvertures en form secteurs, et peuvent tourner autour d'un axe comı mais comme les ouvertures de l'un ne corresponden aux ouvertures de l'autre, ainsi que le fait voir la figure il en résulte qu'un rayon de lumière ne peut jamais trav le système des deux disques, quelle que soit d'ailleu vitesse de rotation. Ils sont l'un et l'autre enfermés une boîte noircie qui reste immobile, et dans les par laquelle sont pratiquées deux ouvertures. La lumièr laire arrive par l'une d'elles, tombe sur le corps doı veut étudier la phosphorescence, et qui est fixé entre les disques, dans l'axe des fenêtres extérieures de la boîte ; comme nous venons de le dire, elle ne peut travers l'autre côté. La lueur phosphorescente provoquée da corps passe, au contraire, par l'ouverture opposée, tout fois que le mouvement de rotation amène l'une des fe mobiles en face de l'ouverture extérieure. L'action de

mière sur le corps se reproduit ainsi quatre fois à chaque tour : si la vitesse est suffisante, la phosphorescence développée est



Fig. 241. — Phosphoroscope de M. E. Becquerel.

continue, et la sensation produite dans l'œil de l'observateur l'est pareillement.

Le phosphoroscope ainsi construit laisse arriver au corps qu'on observe une quantité de lumière constante, quelle que soit la vitesse de rotation ; il en est de même pour la quantité de lumière phosphorescente qui arrive à l'œil ; mais la durée de l'action continue de la lumière sur le corps varie avec cette vitesse, puisqu'elle est égale au temps qu'une ouverture met à passer devant lui ; cette durée se mesure d'ailleurs aisément, quand on connaît les dimensions de l'ouverture et le nombre des



Fig. 242. — Disques du phosphoroscope.

tours que fait en une seconde le système des deux dis
mobiles. En résumé, plus la rotation est rapide, plus es
tite la durée de l'action de la lumière, mais aussi plu
interruptions dans cette action sont courtes, de sorte
doit y avoir une certaine vitesse pour laquelle on obtie
maximum d'éclat.

A l'aide du phosphoroscope, M. Becquerel, outre les rés
que nous avons déjà indiqués plus haut, a pu constater
certains corps des émissions lumineuses dont la duré
excessivement faible, puisqu'elle ne dépasse pas la dix-
lième partie d'une seconde. D'autres, comme les sulfures
de strontium et de calcium, restent phosphorescents pe
trente-six heures. Le diamant luit pendant plusieurs he
Enfin, il a pu étudier la loi suivant laquelle les corps pho
rescents perdent leur lumière par émissions successives.

La lumière émise par divers végétaux et animaux pho
rescents, a été soumise à l'analyse spectrale ; on a trouv
les spectres de ces lumières sont continus, qu'on n'y peu
tinguer ni raies obscures, ni raies brillantes.

§ VII. QU'EST-CE QUE LA LUMIÈRE?

Jusqu'à présent, nous nous sommes borné à décri
phénomènes lumineux, tels que l'observation les donne
faire aucune hypothèse sur la nature intime de l'agent
provoque la perception par nos organes. Tout ce que
savons, c'est que les divers corps de la nature peuven
rangés en deux catégories : dans la première se trouve
sources lumineuses, c'est-à-dire les corps susceptibles d
duire directement et par eux-mêmes la lumière ; l
comprend les corps qui transmettent de diverses faço
lumière émanée des sources, mais qui, dans leur état
ne peuvent en émettre directement.

Parmi les sources lumineuses, il en est, comme le S

la plupart des étoiles, qui nous paraissent permanentes, ou du moins dont le pouvoir émissif ne s'est point affaibli depuis des milliers d'années : c'est sans doute par millions de siècles qu'il faut compter, si l'on veut chercher à évaluer la durée probable de ce pouvoir. Mais il ne paraît pas douteux qu'elles ne diffèrent point essentiellement des sources lumineuses temporaires, que nous avons à notre disposition à la surface du globe. Ces dernières doivent leur état, soit à une très-haute température, qui détermine des combinaisons chimiques propres à dégager de la lumière, soit à un état de tension électrique donnant lieu au même phénomène. Tout ce qu'on sait de la constitution physique du Soleil tend à prouver que c'est un immense foyer à l'état d'incandescence, dont la température est excessive, mais dont la production en chaleur et en lumière ne peut avoir lieu, sans une consommation correspondante des forces vives d'une autre espèce.

Enfin, nous venons de voir que parmi les corps de la seconde catégorie, il en est un grand nombre qui peuvent acquérir momentanément, sous l'influence de la température, de l'insolation, de certaines actions chimiques ou mécaniques, la propriété de luire par eux-mêmes, ce qu'on nomme la phosphorescence, et cela sans qu'il y ait incandescence ou combustion vive.

Toutefois, sans nous être demandé encore ce que c'est que la lumière, nous savons qu'elle ne se transmet pas instantanément, qu'elle met un temps fini à se propager d'un point à un autre, en un mot, que c'est un mode particulier de mouvement. Il reste à savoir en quoi consiste ce mouvement, si la lumière est une substance incessamment lancée par les corps lumineux, ou si c'est un ébranlement produit dans un milieu spécial, et se propagent de proche en proche à travers l'espace. Ce sont là des questions d'un si haut intérêt qu'elles s'imposent nécessairement à l'esprit; leur examen aura d'ailleurs de plus l'avantage précieux de nous fournir une explication des phénomènes qui nous restent à décrire. Le moment est

donc venu de donner une idée de la théorie, généralement admise aujourd'hui par tous les physiciens, à l'aide de laquelle tous les phénomènes de l'optique se trouvent être autant de conséquences d'un principe unique. Mais nous donnerons en même temps quelques détails sur une autre hypothèse, qui a longtemps partagé avec la première le privilége de servir de lien commun aux phénomènes.

Parlons d'abord de l'ancienne théorie, connue sous le nom de *théorie de l'émission.*

Suivant Newton, qui l'a le premier réduite en système, la lumière serait formée de molécules matérielles d'une excessive ténuité, que les sources lumineuses émettent à tout instant, et qu'elles projettent dans l'espace avec une vitesse uniforme: c'est le choc de ces projectiles sur la rétine qui, ébranlant les nerfs optiques, déterminerait la sensation de la lumière. Ces particules sont douées de forces attractives et répulsives, qui se manifestent dans le voisinage des molécules des corps et produisent, les forces attractives la réfraction et la réflexion intérieure, les forces répulsives la réflexion extérieure. Il y a autant d'espèces de particules que de couleurs, et chaque espèce est douée d'une réfrangibilité particulière.

Les particules successives qui suivent la même ligne droite forment un rayon lumineux; mais elles peuvent être séparées par de grands intervalles. En effet, il est prouvé que l'impression lumineuse sur la rétine dure environ $^1/_{10}$ de seconde; il suffirait donc que 10 particules lumineuses vinssent en une seconde frapper notre œil, pour que l'impression causée par l'une d'elles ne fût pas effacée avant l'arrivée de la seconde, ou, ce qui revient au même, pour qu'il y eût sensation continue: en les supposant également espacées, elles se suivraient à 29 800 kilomètres ou 7450 lieues de distance les unes des autres. En supposant qu'elles se succèdent au nombre de 100 par seconde, il y aurait encore de l'une à l'autre 2980 kilomètres d'intervalle.

On conçoit donc, dans cette hypothèse, comment les rayons

lumineux émanés de sources diverses peuvent se croiser dans tous les sens, sans se faire obstacle. Mais il faut supposer à la masse de chacune d'elles une valeur si petite que l'imagination a de la peine à s'en faire l'idée. J. Herschel fait à ce propos la comparaison suivante : « Si une molécule de lumière, dit-il, pesait un seul grain ($0^{gr}\cdot065$), son effet serait égal à celui d'un boulet de canon de plus de 150 livres (56 kilogr.) animé d'une vitesse de 305 mètres par seconde. Quelle doit donc être cette ténuité, si des milliards de molécules rencontrées par des lentilles ou des miroirs n'ont jamais pu communiquer le moindre mouvement aux appareils les plus délicats imaginés exprès pour ces expériences! » (*Traité de la Lumière*, t. I.)

Nous venons de dire que pour expliquer les phénomènes de la réflexion et de la réfraction de la lumière, Newton supposait que chaque molécule est, soit repoussée, soit attirée par les molécules des corps. L'intensité de ces forces qui s'exercent dans des sphères infiniment petites, est prodigieuse; on a calculé qu'elles surpassent l'intensité de la pesanteur à la surface de la Terre au point qu'il faudrait, pour en exprimer la valeur en nombres, multiplier cette dernière intensité par un nombre formé du chiffre 2 suivi de 44 zéros.

Dans la théorie aujourd'hui adoptée, celle des ondulations, nous allons trouver des nombres qui ne le cèdent guère aux précédents : ce n'est donc pas la difficulté de les concevoir qui lui a fait donner la préférence sur celle de l'émission.

C'est à Huygens qu'est due la première exposition rigoureuse de cette théorie, qui a compté parmi ses partisans, dans les siècles derniers, les Hooke, les Euler, et parmi ceux qui l'ont développée et perfectionnée dans le siècle actuel, les Young, les Fresnel. Essayons de résumer la théorie des ondulations dans ses éléments essentiels :

L'hypothèse de l'émission exige que les espaces célestes interplanétaires soient vides de matière, pour livrer un libre passage au mouvement des molécules lumineuses; ou plutôt,

ces espaces ne doivent contenir de matière que ces molécules elles-mêmes. Au contraire, dans l'hypothèse des ondulations, les mêmes espaces sont remplis par un fluide extrêmement subtil et éminemment élastique, qu'on nomme *éther*. Ce milieu pénètre en outre tous les corps, et se trouve répandu dans tous les intervalles que comprennent leurs molécules.

Les corps lumineux sont ceux dont les molécules, en état continuel de vibration, communiquent leur ébranlement intime à l'éther qui, à son tour, propage de proche en proche et dans toutes les directions le même mouvement vibratoire, avec la vitesse uniforme de 298 000 kilomètres par seconde. La vitesse de propagation des ondes lumineuses est la même pour tous les rayons de lumière, quelle que soit leur intensité ou leur couleur. Elle est uniforme et constante dans un milieu homogène; mais elle varie en passant d'un milieu dans un autre; et comme il est admis qu'elle dépend du rapport qui existe entre l'élasticité de l'éther et sa densité, il faut en conclure que ce rapport change lui-même dans les différents milieux, ce qui revient à dire que la disposition des molécules de l'éther n'est pas la même dans les milieux interplanétaires que dans les corps pondérables, et que dans ceux-ci, elle varie avec la nature des substances et leur densité.

Essayons de donner une idée plus nette des vibrations de l'éther.

Chaque molécule d'une source lumineuse exécute une série de vibrations très-rapides, c'est-à-dire de mouvements de va-et-vient autour d'une position d'équilibre. Ces vibrations se communiquent à l'éther, dont les diverses molécules effectuent des mouvements de va-et-vient semblables à ceux de la source, et se communiquant sphériquement de proche en proche. Pendant le temps qu'une molécule d'éther met à faire une oscillation complète autour de sa position d'équilibre, son mouvement se communique, dans le sens de la propagation de la lumière, à une file de molécules dont la plus éloignée est à une certaine distance de la première : c'est cette distance

ces espaces ne doivent contenir de matière que ces molécı elles-mêmes. Au contraire, dans l'hypothèse des ondulati(les mêmes espaces sont remplis par un fluide extrêmem subtil et éminemment élastique, qu'on nomme *éther*. Ce mi pénètre en outre tous les corps, et se trouve répandu dans t les intervalles que comprennent leurs molécules.

Les corps lumineux sont ceux dont les molécules, en continuel de vibration, communiquent leur ébranlement time à l'éther qui, à son tour, propage de proche en proch dans toutes les directions le même mouvement vibratoire, a la vitesse uniforme de 298 000 kilomètres par seconde. vitesse de propagation des ondes lumineuses est la même p tous les rayons de lumière, quelle que soit leur intensité leur couleur. Elle est uniforme et constante dans un mi homogène; mais elle varie en passant d'un milieu dans autre; et comme il est admis qu'elle dépend du rapport existe entre l'élasticité de l'éther et sa densité, il faut en clure que ce rapport change lui-même dans les différents lieux, ce qui revient à dire que la disposition des moléc de l'éther n'est pas la même dans les milieux interplanéti que dans les corps pondérables, et que dans ceux-ci, varie avec la nature des substances et leur densité.

Essayons de donner une idée plus nette des vibratior l'éther.

Chaque molécule d'une source lumineuse exécute une de vibrations très-rapides, c'est-à-dire de mouvements de et-vient autour d'une position d'équilibre. Ces vibratio communiquent à l'éther, dont les diverses molécules e tuent des mouvements de va-et-vient semblables à ceu la source, et se communiquant sphériquement de procl proche. Pendant le temps qu'une molécule d'éther met à une oscillation complète autour de sa position d'équilibre mouvement se communique, dans le sens de la propag de la lumière, à une file de molécules dont la plus éloign à une certaine distance de la première : c'est cette dis

qu'on nomme la *longueur d'onde*, et l'*onde lumineuse* n'est autre chose que la série des mouvements qui s'effectuent dans cet intervalle pendant la durée d'une oscillation complète d'une molécule d'éther. Comme le même ébranlement qui a pour origine un point de la source de lumière se propage ainsi dans l'éther qui remplit l'espace, avec une vitesse uniforme, il en résulte que tous les points de la surface d'une sphère quelconque ayant le point lumineux pour centre, se trouvent au même instant dans la même phase du mouvement vibratoire. C'est l'ensemble des points d'une quelconque de ces surfaces sphériques, qu'on nomme la *surface de l'onde*. Dans certains milieux, la surface de l'onde peut être ellipsoïdale.

Les ondes lumineuses ont donc avec les ondes sonores une grande analogie : comme celles-ci, elles sont isochrones; comme celles-ci, elles se meuvent avec une vitesse uniforme; comme celles-ci, elles consistent en des mouvements alternatifs d'un milieu élastique autour d'une position d'équilibre seulement tandis que le véhicule du son est un milieu tangible, l'air ou tout autre corps gazeux, liquide ou solide, le véhicule de la lumière est une substance sinon impondérable, du moins intangible. L'onde sonore se propage dans l'air en parcourant en ligne droite 331^{m} par seconde; l'onde lumineuse franchit dans le même temps 298 000 000^{m}. Enfin, tandis que la longueur d'ondulation varie, pour les sons perceptibles, entre 5 millimètres environ et 10 mètres, la longueur maximum d'une ondulation de l'éther n'atteint pas la millième partie d'un millimètre. Mais entre ces deux modes de mouvements vibratoires il existe, comme l'a démontré Fresnel, une différence capitale : tandis que les vibrations sonores s'effectuent dans le sens même de leur propagation, les vibrations lumineuses ont lieu dans un sens perpendiculaire à la direction du mouvement, c'est-à-dire parallèle à la surface des ondes. On a quelque peine à se figurer des vibrations s'effectuant perpendiculairement à la direction à leur propagation. Une comparaison va faire comprendre ce genre de mouvement.

Quand on prend le bout d'une corde très-longue posée e ligne droite sur le sol, et qu'on lui imprime une secousse dar le sens vertical, il en résulte une série d'ondulations qui s propagent jusqu'à l'autre extrémité, et qui toutes s'effectuei dans une direction perpendiculaire à celle de la corde. C'e de la même façon qu'on voit se succéder, à la surface d l'eau, les ondulations que déterminent le jet d'une pierre o de tout autre corps pesant dans le liquide. Il y a entre ces deı phénomènes et le mouvement de l'éther une ressemblance ‹ plus : c'est que la propagation des ondes a lieu, sans qu'il y ‹ pour cela transport des molécules qui les subissent.

Nous verrons bientôt comment on a pu mesurer direct ment les longueurs d'onde des vibrations lumineuses, et cor ment on a reconnu que ces longueurs varient d'une coule à l'autre. Elles sont, comme le montre le tableau suivaı excessivement petites, leur valeur moyenne ne dépassant guè la moitié d'un millième de millimètre. Une fois ces longueuı d'onde connues, un calcul facile permet de calculer nombre des vibrations qu'exécute l'éther en une second quand il propage les diverses couleurs du spectre. La l mière parcourant en effet, en une seconde, un intervalle 298 000 kilomètres, il suffit de diviser ce dernier noml par chaque longueur d'ondulation, pour trouver combien ı seconde comprend de ces vibrations. Voici les résultats tr vés pour les sept principales couleurs du spectre solaire :

		Longueur d'ondes en millionièmes de millimètres.	Nombre de vibrations par seconde.
Rouge moyen.		620	514 000 000 000 000
Orangé	*Id.*	583	557 000 000 000 000
Jaune	*Id.*	551	548 000 000 000 000
Vert	*Id.*	512	621 000 000 000 000
Bleu	*Id.*	475	670 000 000 000 000
Indigo	*Id.*	449	709 000 000 000 000
Violet	*Id.*	423	752 000 000 000 000

Telles sont, en résumé, les deux théories proposées p rendre compte des phénomènes lumineux. Toutes deux ex

quaient avec une égale facilité la réflexion et la réfraction de la lumière; mais, tandis que le système de l'émission exige que la vitesse de propagation soit plus rapide dans les milieux les plus réfringents, celle des ondulations au contraire suppose que cette vitesse est d'autant moindre, que le milieu est doué d'un pouvoir réfringent plus considérable. Il s'agissait donc, pour prononcer entre elles, de déterminer par l'expérience, quel est le rapport de la vitesse de la lumière dans les différents milieux, de résoudre, par exemple, la question suivante : La lumière se propage-t-elle dans l'air plus ou moins rapidement que dans l'eau ?

Or, ce problème important a reçu une solution décisive dans ces dernières années. M. Foucault et M. Fizeau, chacun de leur côté, et par des procédés fort ingénieux, dont le principe avait été employé d'abord par Wheatstone à la mesure de la vitesse de l'électricité [1], sont parvenus à prouver que la lumière se propage avec moins de rapidité dans l'eau que dans l'air, comme l'exige la théorie des ondulations.

D'autres phénomènes que nous allons décrire maintenant sont également favorables à cette dernière théorie, tandis qu'ils ne trouvent dans le système de l'émission aucune explication satisfaisante. Il n'est donc pas douteux que la préférence ne doive être donnée à la théorie qui fait de la lumière, non pas une substance particulière projetée dans le vide par les corps lumineux, mais un mouvement vibratoire se propageant dans un milieu qui remplit tout l'espace, aussi bien ce qu'on est convenu d'appeler le vide interplanétaire que les interstices des molécules des corps pondérables.

1. C'est F. Arago qui eut le premier l'idée de se servir de la méthode du miroir tournant de Wheatstone, pour comparer les vitesses de la lumière dans différents milieux.

CHAPITRE IV.

INTERFÉRENCE DES ONDES LUMINEUSES. — PHÉNOMÈNE DE DIFFRACTION ; RÉSEAUX.

§ I. INTERFÉRENCE DES ONDES LUMINEUSES.

En 1665, le P. Grimaldi publia à Bologne un curi ouvrage intitulé *Physico-mathesis de lumine*, dans le se trouvent décrits pour la première fois des phénomè auxquels il donna le nom, qu'ils conservent encore, de p nomènes de *diffraction*. Voici en quoi consistent ces nouveaux, que les physiciens ont étudiés et multipliés de au point d'en faire une branche importante de l'optique.

Ayant introduit un trait de lumière dans la chambre obs à travers une très-petite ouverture, Grimaldi remarqua les ombres des corps opaques étroits, exposés à cette mière, sont beaucoup plus étendues qu'elles ne devr l'être d'après la marche en ligne droite des rayons lumin En outre, ces ombres se trouvent bordées de franges colo parallèles entre elles et aux bords des corps opaques phénomène disparaît, si, au lieu d'une étroite ouverture, par un large trou que passe le faisceau de lumière.

En substituant au corps opaque une très-petite ouve circulaire percée dans une lame métallique, par exemple, recevant la lumière sur un écran, on obtient des anneaux centriques de franges colorées, situées les unes dans l'i géométrique de l'ouverture, les autres au dehors, c'est-à en dedans de l'ombre de la plaque. Enfin deux ouver

très-voisines donnent deux séries d'anneaux qui se superposent en partie, et de plus, on aperçoit trois séries de franges obscures rectilignes, qui disparaissent dès qu'on bouche l'un des trous (fig. 243). Cette dernière expérience causa un étonnement profond dans le monde des physiciens, dont elle bouleversait toutes les idées qu'ils s'étaient faites jusqu'alors sur la nature de l'agent lumineux. Et, en effet, elle mettait en évidence ce singulier résultat, que *de la lumière ajoutée à de la lumière produit en certain cas de* L'OBSCURITÉ !



Fig. 243. — Expérience de Grimaldi. Franges obscures et franges brillantes produites par un système de deux petites ouvertures circulaires.

Newton étudia les phénomènes de diffraction révélés par le physicien bolonais; il y joignit des observations nouvelles, et chercha à expliquer la diffraction par une déviation que les bords des corps opaques font subir aux rayons de lumière. Fraunhofer, Young et enfin Fresnel achevèrent d'en découvrir les lois, et ce dernier savant les rattacha de la façon la plus heureuse à la théorie des ondulations. Avant de poursuivre la description des phénomènes, donnons une idée de ce que Young a appelé le *principe des interférences*, principe dont il a nettement exposé la théorie dans le système des ondulations, et que plus tard Fresnel a démontré par la fameuse expérience des deux miroirs.

Supposons que deux rayons de lumière suivent la même direction AB, qu'ils aient même intensité, et que les longueurs d'onde de chacun d'eux soient égales, auquel cas les mouvements de vibration de l'éther auront même amplitude aux mêmes phases. Si les ondes du premier rayon coïncident avec celles du second, il est clair que leurs intensités devront s'ajouter : la quantité de lumière sera augmentée par leur concours. Mais si l'un d'eux est en retard sur l'autre, et cela précisément d'une demi-longueur d'onde, les molécules d'éther

situées le long de la ligne AB seront sollicitées d'un côté
des forces dont l'intensité et la direction seront représer
par la courbe *aaa....*, et d'autre côté par des forces égal
contraires représentées par la courbe *a'a'a'*.... Toute molé
telle que *m*, restera donc en repos sous l'action de ces fo
opposées; le mouvement vibratoire cessera, et l'obscu
succédera à la lumière. On dit alors que les ondes ou les ra
lumineux *interfèrent*. Même résultat, si le résultat était de
5/2.... et en général d'un nombre impair de demi-ondulati
S'il est d'un nombre pair de demi-ondulations, le résulta
le même que s'il y avait coïncidence. Enfin, entre ces



Fig. 244. — Interférence des ondes lumineuses.

cas extrêmes, l'intensité lumineuse est tantôt augmentée,
tôt diminuée; mais il n'y a en aucun point destruction abs
de lumière.

Théoriquement, ce raisonnement, qui est une conséqu
nécessaire du système des ondulations, rend parfaite
compte de l'expérience de Grimaldi, et de toutes celle
apparaissent des franges obscures ou brillantes. Il re
néanmoins à le vérifier par l'observation, et c'est ce qu'a
Fresnel, notamment par l'expérience des deux miroirs
nous avons parlé plus haut. Cette expérience est trop
portante pour que nous ne la rapportions pas ici : la na
et les bornes de cet ouvrage ne nous permettant point d'a
der l'explication théorique de la plupart des phénomèn
faut tout au moins que le principe en soit exposé assez
rement, pour que le lecteur accepte les conséquences
confiance.

Deux miroirs plans ON, OM, en métal ou en verre noir, sont placés verticalement dans la chambre obscure, de manière à faire entre eux un angle très-obtus. En avant de ces miroirs, un faisceau de lumière solaire est concentré en S par une lentille sphérique ou cylindrique, de manière à donner



Fig. 245. — Expérience des deux miroirs de Fresnel; démonstration expérimentale du principe des interférences.

soit un point, soit une ligne lumineuse. Deux images se forment dans l'un et dans l'autre miroir, l'une en s pour le miroir ON, l'autre en s' pour le miroir OM. On a donc ainsi deux sources de lumière qui offrent cette particularité qu'émanant d'une source commune, elles sont à tout instant dans le même état de vibration. Si maintenant on place un écran vertical en avant des miroirs, et de façon à recevoir à la fois les faisceaux lumineux émanés des deux images, on

apercevra sur l'écran une bande brillante dans la directi
prolongement de la ligne OA, et, de chaque côté de cette b
une série de franges alternativement obscures et brill
Si l'on masque l'un des deux miroirs, à l'instant les fr
disparaissent; l'écran reste uniformément éclairé.

On le voit, le phénomène est le même que dans l'expé
des deux ouvertures de Grimaldi, et il reste à explique
de la lumière ajoutée à de la lumière peut produire de
scurité; ou, comme nous l'avons vu, que partout où
des franges obscures, c'est que les ondes lumineuses
nées des deux sources interfèrent, qu'elles sont au con
dans la même phase, partout où l'on aperçoit les frange
lantes. C'est ce que montre la figure 245, où l'on voit trac
ondes concentriques émanées de s et de s'. Ces deux sys
d'ondes se croisent et se coupent en divers points. Or
de ces points qui, tels que a, sont situés sur la perpendic
AO à ss', sont dans la même phase d'ondulation dan
comme dans l'autre système, puisque les rayons sa, $s'a$
de même longueur, il en est de même des chemins
SI'a, suivis par les deux ondes lumineuses émanées
source S, et réfléchies sur l'un et sur l'autre miroirs.
est de même pour tous les points $a'aa'$.... situés dans l
vertical passant par AO. Les intensités lumineuses s'aj
donc dans ce plan; de là, la frange centrale brillante
points tels que n, n', la différence de marche des ond
se croisent en ces points est d'une demi-longueur d'on
plus loin d'un nombre impair de demi-ondulations :
interférence et par suite frange obscure : il en est de
pour les points mm'.... Plus loin, les points bb'.... cc'....
tiennent à des rayons dont chacun est en retard sur
d'un nombre pair de demi-longueurs d'onde : *frange
lantes*.... et ainsi de suite.

Fresnel a employé successivement, pour faire cette
rience capitale, des lumières de toutes les couleurs si
il a trouvé des franges de chacune de ces teintes, mais d

plus serrées qu'on s'éloigne plus du rouge dans la série des couleurs prismatiques. Le violet donne les franges les plus étroites. C'est en mesurant avec une grande précision les distances des franges, que l'illustre physicien est parvenu à en déduire les longueurs d'ondulations des lumières de diverses couleurs, et par suite les nombres de vibrations exécutées par l'éther dans le court intervalle d'une seconde, nombres si prodigieusement grands, comme nous l'avons vu plus haut. Les franges provenant de la lumière blanche doivent donc être formées des franges colorées de chacune des teintes du spectre, se superposant de façon à ce que le violet soit du côté de la bande brillante centrale. C'est aussi ce que constate l'observation.

Ainsi se trouva confirmée par une expérience mémorable la vérité de la théorie des ondulations, dont l'analyse mathématique a su tirer d'ailleurs une foule de conséquences, les unes déjà connues par l'observation, les autres devançant l'observation même, et lui servant de guide. Les noms d'Huygens, d'Young et de Fresnel resteront désormais attachés à cette belle théorie, comme celui de Newton l'est à celle de la gravitation universelle.

§ II. PHÉNOMÈNES DE DIFFRACTION.

Revenons maintenant aux phénomènes de diffraction qui tous se rattachent au principe de l'interférence des ondes lumineuses. Ils sont nombreux : aussi ne choisirons-nous, dans le nombre, que quelques-uns des plus remarquables.

Newton, en répétant et en variant les expériences de Grimaldi, sur les ombres agrandies des corps déliés tels que des cheveux, des fils, des épingles, des pailles, s'assura que la déviation des rayons lumineux n'était pas due, comme on l'avait cru d'abord, à une réfraction dans une mince couche d'air plus dense, environnant le corps. Il vit aussi que les franges se formaient, quelle que fût la nature des substances

employées. Qu'il s'agit de métaux, de pierres, de ver
bois, de glace, etc., il reconnut toujours trois franges s
cédant ainsi à partir de l'ombre : frange intérieure :
bleu foncé, bleu clair, vert, jaune et rouge ; frange int
diaire : bleu, jaune et rouge ; frange extérieure : bleu
jaune pâle et rouge. Il remarqua aussi le fait, que les lu
simples du spectre donnent des franges inégalement se
Mais, de toutes ses expériences, il ne conclut autre chose,
que les rayons de lumière subissent, en passant vers les
des corps, des inflexions d'autant plus fortes qu'ils ras
plus près leur surface. C'etait une hypothèse naturell
le système de l'émission ; mais nous venons de voir que
l'explication véritable.

Toutes les expériences, fort nombreuses, exécutées
peuvent se ranger en deux espèces : la première compr
phénomènes de diffraction produits par des bords recti
par exemple par une ou plusieurs fentes très-étroit
forme de parallélogrammes, ou par un écran très-min
fil métallique, un cheveu : la seconde comprend les
mènes obtenus quand la diffraction s'opère à travers
plusieurs ouvertures très-petites, carrées, triangulaires,
laires, ou sur les bords d'un écran circulaire d'une très
dimension. Les planches V et VI représentent les systè
franges produits dans ces circonstances variées ; les un
sées, proviennent de la lumière blanche ; les autres, mo
matiques, d'une lumière simple, par exemple de la l
rouge. On voit, dans plusieurs cas, les franges accomp
d'une multitude de petits spectres dont les vives couleu
tent à la beauté du phénomène.

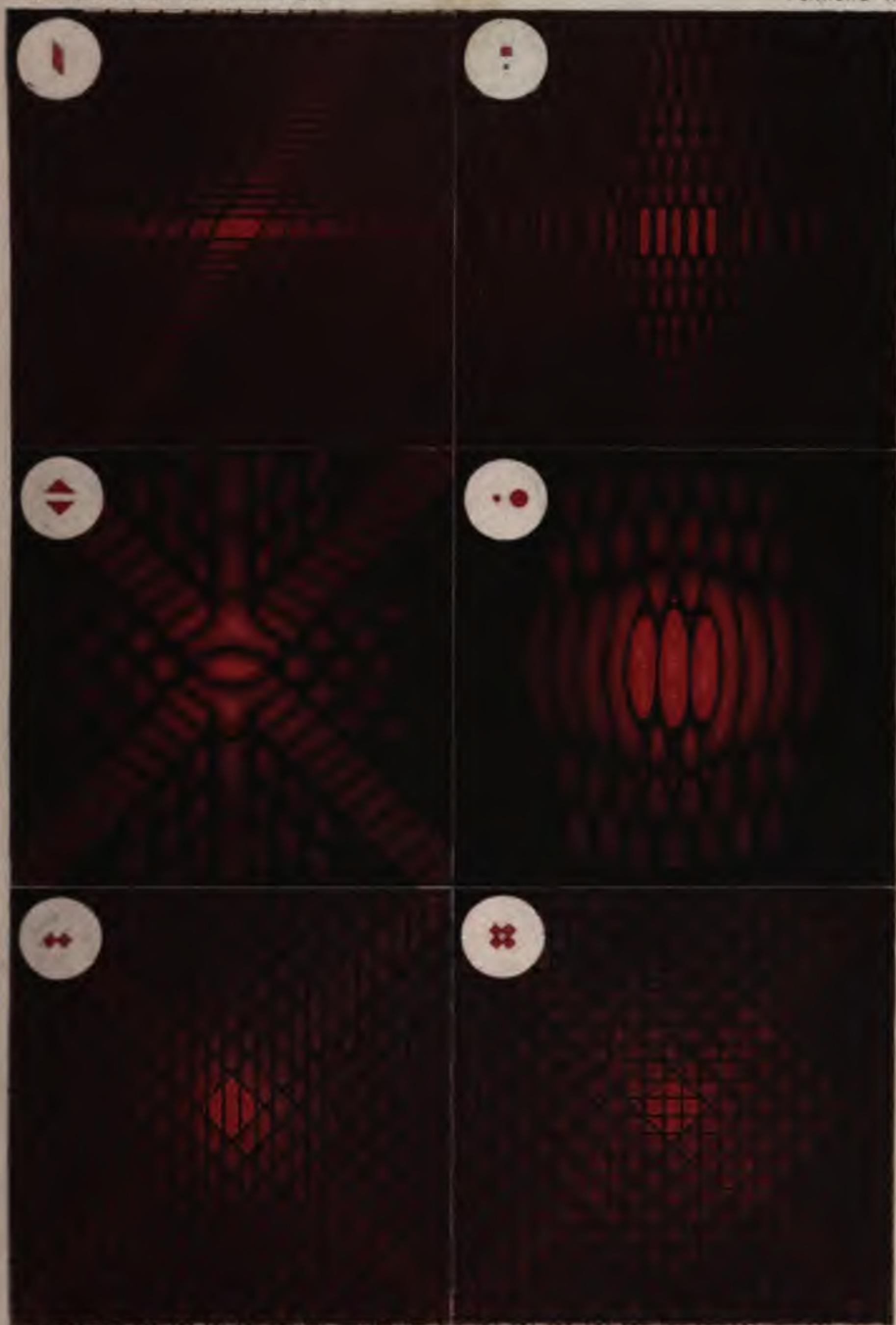
J. Herschel a observé de curieux effets de diffraction,
çant devant l'objectif d'une lunette astronomique d
phragmes de formes variées, et en observant ainsi diff
étoiles simples ou doubles. Avec une ouverture annula
vu des anneaux colorés environnant les images des poi
mineux, qui présentaient alors des disques semblables



FRANGES MONOCHROMATIQUES

Phénomènes d'interférence

DIFFRACTION PAR DE PETITES OUVERTURES



FRANGES MONOCHROMATIQUES

Phénomènes d'Interférence

DIFFRACTION PAR DE PETITES OUVERTURES.

Imp. F. Lamoureux — Paris.

des planètes. Des diaphragmes triangulaires donnaient au contraire des étoiles à six rayons; une ouverture formée par douze carrés concentriques, donnait une étoile à quatre rayons; enfin, en perçant régulièrement des triangles équilatéraux sur le diaphragme, il obtint une série de disques circulaires rangés sur six lignes qui vont en divergeant à partir du disque central incolore et très-brillant : ils sont entourés chacun d'un anneau plus ou moins coloré et vont s'allongeant en spectres, à mesure qu'ils s'éloignent du centre.



Fig. 246. — Effets de diffraction dans les lunettes, d'après J. Herschel.

Tous ces phénomènes sont certes extrêmement curieux; les magnifiques couleurs qu'ils présentent à l'œil en font autant de tableaux dont la variété égale la splendeur. Mais, aux yeux du physicien, ils offrent un genre d'intérêt bien plus précieux encore, en ce sens qu'ils sont autant de confirmations de la belle théorie des ondulations de l'éther. L'analyse mathématique, appliquée aux différents cas de diffraction, donne des résultats qui concordent d'une façon merveilleuse avec ceux de l'observation. Nous avons dit plus haut qu'elle les avait quelquefois devancés : en voici un exemple bien remarquable. Le géomètre Poisson, ayant soumis au calcul le problème qui consiste à déterminer l'ombre et les franges produites par un très-petit disque opaque exposé à la lumière qui

diverge d'un point lumineux, trouva que le centre de l'o
devait être aussi brillant que si le disque n'existait pas :
lumière était l'effet résultant de la diffraction des ondes
neuses sur le bord de l'écran. Un tel résultat était si o
aux observations antérieures, que Poisson le présenta c
une objection sérieuse à la théorie des ondulations. Mais .
ayant fait l'expérience avec le soin nécessaire, en empl
un petit disque de métal cimenté dans une plaque de
parfaitement homogène et diaphane, le point lumineux
rut, comme le calcul l'avait indiqué. On eût dit que l'
était produite par un écran percé au centre. C'est év
ment là un des plus beaux triomphes de la théorie, un t
gnage décisif en faveur du système des ondulations
l'existence de l'éther.

§ III. LES RÉSEAUX.

Fraunhofer, dont nous avons cité déjà les belles expér
sur les raies du spectre, porta, dans l'étude des phéno
de diffraction, ce génie de la précision qui le distingua
si haut degré. Après avoir observé les images produit
un nombre très-limité de petites ouvertures, il eut l'idée
ce qui se passait quand la lumière traverse un réseau
d'une multitude de fils très-fins, parallèles ou croisés.
ploya d'abord un réseau en fil d'archal, composé d'un
nombre de fils très-fins tendus sur un cadre rectangula
moyen de deux vis parfaitement semblables. Puis, pour c
une plus grande régularité et une plus grande finesse d
intervalles qui laissent passer la lumière, il traça su
plaques de verre couvertes d'une feuille d'or des lignes
lèles et équidistantes ; puis grava les mêmes traits au d
sur le verre même, formant ainsi plus de 1000 divisio
millimètre. Chaque strie est un écran opaque, et les inte
des stries laissent passer la lumière. Du reste, un nombr



FRANGES POLYCHRÔMATIQUES

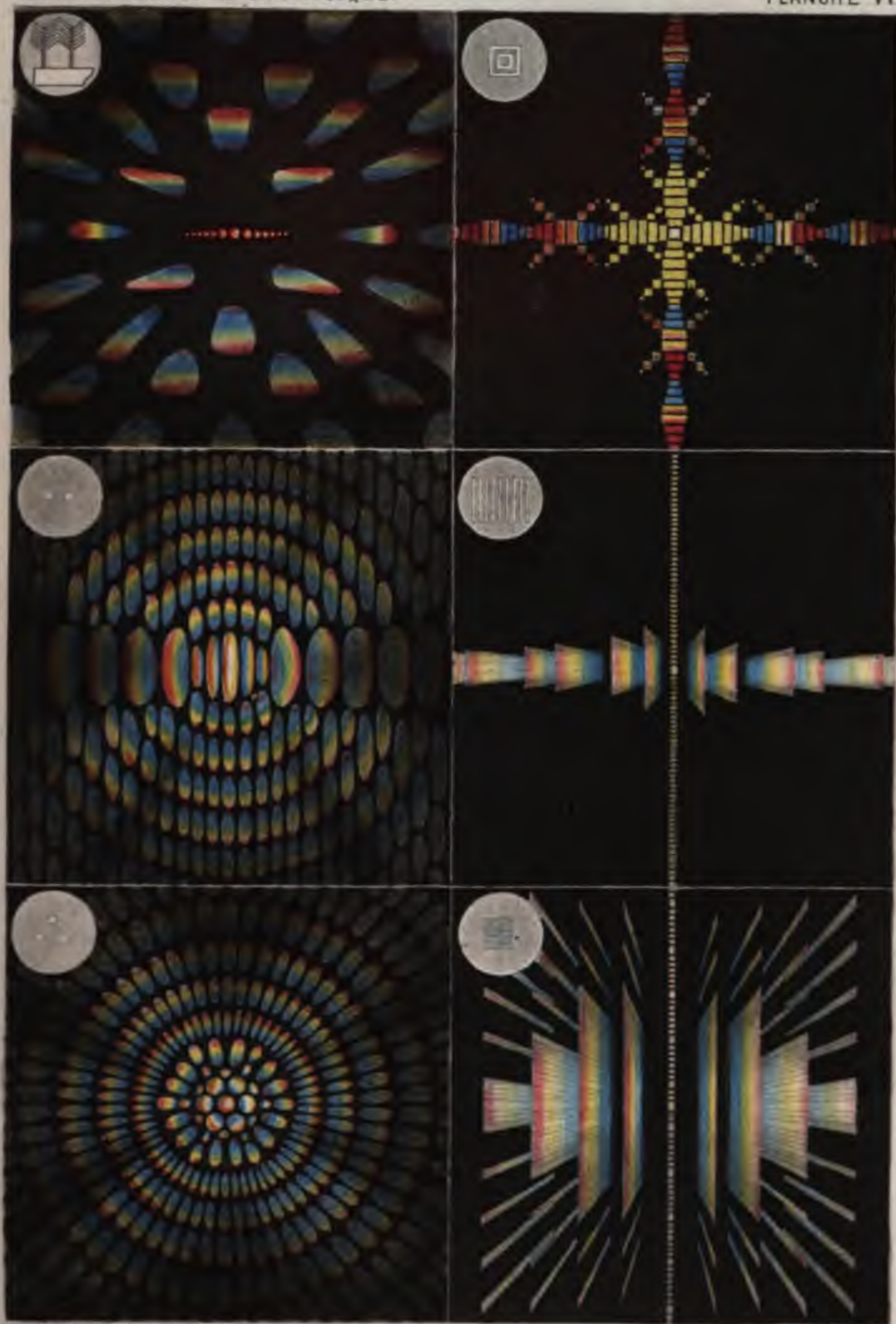
Phénomènes d'Interférence

DIFFRACTION PAR LES RÉSEAUX

diverge d'un point lumineux, trouva que le centre de
devait être aussi brillant que si le disque n'existait pas
lumière était l'effet résultant de la diffraction des ond
nantes sur le bord de l'écran. Un tel résultat était si
aux observations antérieures, que Poisson le présenta
une objection sérieuse à la théorie des ondulations. Ma
ayant fait l'expérience avec le soin convenable, en ex
un petit disque de métal incrusté dans une plaque
parfaitement homogène et diaphane, le point lumineux
ral, comme le calcul l'avait indiqué. On eût dit que
était produite par un trou percé au centre. C'est
ment là un des plus beaux triomphes de la théorie, et
grand intérêt en faveur du système des ondulations
l'existence de l'éther.

§ [illegible]. — RÉSEAUX.

Le physicien dont nous connaissons déjà les belles exp
au moyen de réseaux, poussa, dans l'étude des phé
de diffraction, le génie de la précision qui le distingu
à un haut degré. Après avoir observé les images produ
par un nombre très-limité de petites ouvertures, il eut l'idé
de ce qui se passait quand la lumière traverse un résea
d'une multitude de fils très-fins, parallèles ou croisés
ploya d'abord un réseau en fil d'archal, composé d'u
nombre de fils très-fins tendus sur un cadre rectangu
moyen de deux vis parfaitement semblables. Puis, pou
une plus grande régularité et une plus grande finesse
intervalles qui laissent passer la lumière, il traça
plaques de verre couvertes d'une feuille d'or des ligne
lèles et équidistantes, puis grava les mêmes traits su
sur le verre même. Il traçait ainsi plus de 1000 divis
millimètre. Chaque strie est un écran opaque, et les in
des stries laissent passer la lumière. Du reste, un nomb



FRANGES POLYCHRÔMATIQUES

Phénomènes d'Interférence.

DIFFRACTION PAR LES RÉSEAUX.

coup moindre de divisions rend le réseau plus régulier, et 38 traits suffisent au besoin pour observer les phénomènes.

Outre les réseaux à lignes parallèles, Fraunhofer étudia les réseaux à mailles carrées, formés par deux séries de lignes se croisant à angle droit, et ceux à mailles circulaires ou de toute autre forme. Il obtint de la sorte un grand nombre de figures où les franges et les spectres se distribuaient avec une symétrie merveilleuse; mais il fit plus, il étudia les lois de cette distribution, lois que M. Babinet a prouvé être autant de conséquences nécessaires du principe des interférences.

On voit dans la planche VI le phénomène résultant du passage de la lumière à travers un réseau à lignes parallèles : au milieu est une ligne brillante, puis deux larges intervalles obscurs suivis de chaque côté de deux spectres dont le violet est tourné vers le centre, et si purs, que les raies sombres y sont aisées à distinguer. Au delà, viennent deux nouvelles bandes obscures, et enfin deux séries de spectres superposés de plus en plus étalés et plus pâles. Un réseau à mailles carrées donne l'image représentée, dans la même planche VI, au-dessous de la précédente : outre la ligne brillante centrale et deux séries de spectres plus étalés que ceux du réseau à mailles parallèles, on voit dans les quatre angles droits une multitude de petits spectres rayonnant vers le centre. Newton avait entrevu l'identité des phénomènes de diffraction par les petites ouvertures et par les réseaux, comme il ressort de ce passage de son Optique : « En regardant le soleil au travers d'une plume ou d'un ruban noir tenu tout près de l'œil, on verra plusieurs arcs en ciel; parce que les ombres que les fibres ou filets jettent sur la rétine sont bordées de pareilles franges colorées. » La figure 1 de la planche VI représente l'effet produit par la diffraction de la lumière solaire à travers le réseau que forment les barbes d'une plume d'oiseau. On peut également observer des franges de même nature, en observant la lumière d'une bougie, les yeux presque fermés : les cils en se joignant forment alors les mailles d'un réseau irrégulier.

C'est encore par l'interférence des rayons lumineux qu physiciens expliquent les brillantes couleurs qu'on disti sur certains corps dont la surface est couverte d'une m tude de stries très-fines plumes de quelques oiseau surface de la nacre de p sont formées d'une multi de raies qui reflètent tout couleurs du prisme. Brew ayant eu l'occasion de fix la nacre de perle à un g mètre avec un ciment de r et de cire, fut tout surpr voir la surface de la cire lant des couleurs prismati



Fig. 247. — Stries de la nacre de perle, vues par transparence à l'aide d'un grossissement de 20000 diamètres.

de la nacre : il répéta l'expérience avec diverses substa du réalgar, du métal fusible, du plomb, de l'étain, colle de poisson; toujours il vit apparaître les mêmes coul Un Anglais, John Barton, eut l'idée d'appliquer cette pro des surfaces striées : il tailla à facettes très-fines des bo d'aciers et divers bijoux qui, à la lumière du soleil, d ou des bougies, laissaient voir des dessins brillant de t les nuances du prisme : « Ces couleurs, dit Brewster, s peine surpassées par les feux du diamant. »

Voici encore un phénomène qui paraît se rattache phénomènes d'interférence, ainsi que l'a expliqué M. net. En voici la description d'après M. A. Necker:

« Pour jouir de la vue de ce phénomène, dit-il, il fau placé au pied d'une colline interposée entre l'observateu place où le soleil se couche ou se lève. On est ainsi com ment dans l'ombre; le bord supérieur de la colline ou tagne est couvert de bois, ou d'arbres et de buissons dét qui se projettent en noir sur un ciel parfaitement cl brillant, sauf la place même à laquelle le soleil est sur le de paraître ou vient de disparaître. Là, tous les arbres

buissons qui bordent la sommité, dans leur totalité, branches, feuilles, troncs, etc., paraissent d'une blancheur vive et pure, et brillent d'une lumière éclatante, bien que projetée sur un fond qui est lui-même lumineux et brillant, comme l'est toujour la partie du ciel voisine du soleil. Les moindres détails des feuilles, des petits rameaux sont conservés dans toute leur délicatesse, et on dirait des arbres et des forêts faits de l'argent le plus pur, avec tout l'art de l'ouvrier le plus habile. Les hirondelles et autres oiseaux qui traversent en volant cette même région, paraissent comme des etincelles de la blancheur la plus éclatante. »

Pour celui qui sait observer, on le voit, la nature est d'une magnificence que l'habileté des expérimentateurs les plus ingénieux ne dépasse jamais. Ce qui fait le mérite du savant, ce n'est pas tant de la reproduire, de multiplier les phénomènes dont elle nous offre le tableau, c'est, à force de patience, de sagacité, de génie, de découvrir les raisons des choses, les lois de leurs manifestations. A ce point de vue, l'histoire de la physique est certainement l'un des plus beaux titres de gloire de l'esprit humain.

§ IV. ANNEAUX COLORÉS DANS LES LAMES MINCES.

Les phénomènes les plus beaux, les plus brillants ne sont pas toujours ceux qui exigent, pour être reproduits, les appareils les plus coûteux ni les plus compliqués, ni le plus de mise en scène. Qui de nous, dans son enfance, ne s'est amusé à gonfler et à lancer dans l'air, à l'aide d'un peu d'eau de savon, d'un tuyau de plume ou de paille, ces bulles légères, à la forme si belle et si pure, aux couleurs si délicates et si variées?

A l'origine, quand la sphère liquide n'a encore qu'un faible diamètre, la pellicule qui en limite les contours est incolore et transparente. Peu à peu, l'air qu'on insuffle à l'intérieur, pressant également de toutes parts la surface concave, agrandit le

diamètre aux dépens de l'épaisseur : c'est alors qu'on apparaître, faibles d'abord, puis plus vives, une série de leurs naissant les unes à la suite des autres, et formant par mélange une multitude de teintes irisées, jusqu'au mome la bulle, diminuant d'épaisseur, n'offre plus une résistanc fisante à l'action du gaz qu'elle renferme. Des taches noir montrent alors au sommet, et bientôt la bulle crève. C'est dernière période du phénomène que représente la planche on y voit, à la partie supérieure de la sphère liquid taches noires qui annoncent sa prochaine disparition.

Cette expérience, si simple, cette récréation enfantine offre tant d'attraits aux yeux de l'artiste amoureux des leurs, n'est pas moins belle ni moins intéressante aux du savant. Newton en a fait l'objet de ses études et de se ditations, et, depuis ce grand homme, les couleurs de la de savon tiennent une place légitime parmi les plus cu phénomènes de l'optique. Ce n'est, d'ailleurs, qu'un cas culier de toute une série de phénomènes qu'on observe, t les fois que la lumière est successivement réfléchie et réf sur les surfaces qui limitent les lames minces des corps parents. Les solides, les liquides et les gaz sont égal propres à ce genre d'expérience. Les cristaux que le c réduit en lamelles d'une faible épaisseur comme le mi gypse, le talc, le verre soufflé en boules extrêmement m la surface de l'acier recuit que recouvre une couche d'c laissent voir des couleurs irisées tout à fait semblables à de la bulle de savon. Les vives nuances qui décorent le membraneuses des libellules, celles qu'on aperçoit s morceaux de verre longtemps exposés à l'humidité, à la s des eaux grasses, appartiennent à la même série de p mènes. On les étudie, en physique, sous la dénominatio mune d'*anneaux colorés dans les lames minces*.

Avant de dire quelle est la cause de cette décomposit la lumière en ses couleurs simples, essayons de donn idée des conditions dans lesquelles elle se produit, et d

qui président à la succession de ces nuances, au premier abord si changeantes et si mobiles.

Suivons Newton dans ses mémorables expériences. Le point de départ du grand physicien fut l'observation suivante :

« Ayant pressé fortement, dit-il, dans son *Optique*, deux prismes l'un contre l'autre, pour faire que leurs côtés (qui par hasard étaient tant soit peu convexes) pussent se toucher l'un l'autre, j'aperçus que l'endroit par où ils se touchaient devenait tout à fait transparent, comme s'ils n'eussent

des anneaux colorés de Newton.

colorés de diverses nuances. Pour mieux se rendre compte de la production de ces anneaux, il employa deux verres, l'un plan convexe, l'autre convexe sur ses deux faces, tous deux d'un grand rayon de courbure. Puis il les appliqua l'un contre l'autre, la face convexe sur la face plane en les pressant doucement : dans cette position les deux verres laissaient entre eux, tout autour du point central de contact, un ménisque très-mince, une lame d'air dont l'épaisseur, nulle d'abord, allait en croissant insensiblement. Voici les phénomènes qu'il observa :

En recevant la lumière réfléchie dans une direction à peu

près normale à la surface plane de la lame d'air, il former autour du point de contact une suite d'anne diverses couleurs, concentriques et de plus en plus s mesure qu'ils s'éloignaient du centre. Chaque couleur raissait d'abord comme un cercle de teinte uniforme q largissait par la pression jusqu'à ce qu'une couleur no sortant du centre, transformât la première en un anne loré. Au centre même apparut en dernier lieu une tache

Voici quel fut alors l'ordre et les couleurs des anneau représente la figure 249. Les couleurs sont indiquées à du centre O.

De O	en	A	noir, bleu, blanc, jaune, rouge;
A	—	B	violet, bleu, vert, jaune, rouge;
B	—	C	pourpre, bleu, vert, jaune, rouge;
C	—	D	vert, rouge;
D	—	E	bleu verdâtre, rouge;
E	—	F	bleu verdâtre, rouge pâle;
F	—	G	bleu verdâtre, blanc rougeâtre.

Si, au lieu de recevoir la lumière réfléchie sur les deux surfaces de la lame mince, on regarde au travers du système des deux verres la lumière du ciel, on aperçoit encore une série d'anneaux colorés, mais leurs couleurs sont plus faibles que celles des anneaux vus par réflexion. De plus, l'ordre des couleurs est entièrement différent, et, au lieu d'une tache noire au centre, c'est une tache blanche qui apparaît. Voici la série des diverses teintes formant les anneaux vus par transmission :

Blanc, rouge-jaune, noir, violet, bleu ;
Blanc, jaune-rouge, violet, bleu ;
Vert, jaune-rouge, vert-bleu, rouge ;
Vert bleuâtre ;
Rouge, vert bleuâtre ;
Rouge.

En comparant cette seconde série à la première, on voit que les teintes qui occupent le même ordre dans les deux systèmes d'anneaux sont précisément complémentaires, de sorte que la lumière transmise et la lumière réfléchie en un même point de la lame d'air, réunies, donnent de la lumière blanche. Cette conséquence des deux expériences a été vérifiée par Young et Arago, qui, ayant placé les deux verres de façon à ce que les lumières réfléchies et transmises vinssent à l'œil à la fois et avec la même intensité, virent les anneaux disparaître.

Newton se servit pour observer les anneaux des diverses lumières simples du spectre. Dans ce cas, il aperçut, par réflexion, des anneaux alternativement noirs et lumineux, ces derniers présentant la teinte de la lumière simple employée. Mais les diamètres des anneaux variaient de grandeur, selon la couleur de la lumière : ils se dilataient en passant du violet au rouge. On comprend alors comment il se fait que les anneaux obtenus avec la lumière blanche sont irisés. Les différentes couleurs, dont la lumière blanche est formée, produisent chacune leurs séries d'anneaux ; mais comme les dimensions sont différentes, la superposition n'est pas exacte, les anneaux obscurs

disparaissent, parce qu'ils sont recouverts par diverses nuai
de lumière, au centre excepté, et là seulement où ces nuai
se mélangent dans une proportion convenable, apparaît l'
que anneau de lumière blanche précédemment observé.
interposant de l'eau entre les verres, les anneaux apparais
encore, mais plus petits, plus resserrés et de nuances
faibles. Enfin, si au lieu d'un milieu gazeux ou liquide,
le vide qui forme la lame mince entre les deux verres, on
aussi des anneaux colorés, n'offrant aucune différence sens
avec ceux que donne l'air.

Newton, avec sa sagacité et sa précision accoutumées
s'est point borné à la constatation de ces faits et d'autres
le détail desquels nous ne pouvons entrer; il chercha l
de la production des anneaux, et c'est ainsi qu'il parvint à
tacher au même principe les phénomènes variés que nous a
décrits au début de ce chapitre, les couleurs irisées des b
de savon et des lames minces de tous les corps solides, liqu
ou gazeux. Il mesura avec soin les diamètres des ann
successifs obtenus avec la lumière simple, au moment o
tache noire du centre indiquait qu'il y avait contact entr
verres. Il en déduisit, par les rapports géométriques qui l
les diamètres aux épaisseurs de la lame mince, ces épaiss
mêmes, et il en conclut les lois suivantes :

Les carrés des diamètres des anneaux brillants, vus
réflexion, sont entre eux dans le rapport des nombres
pairs, 1, 3, 5, 7, 9....

Les carrés des diamètres des anneaux obscurs sont co
les nombres pairs, 2, 4, 6, 8....

Quant aux anneaux vus par transmission, comme ils o
pent des positions précisément inverses, chaque anneau ob
étant remplacé par un anneau brillant, chacun de ceu
par un anneau obscur, leurs diamètres suivent évidem
les mêmes lois, où les séries des nombres seraient interve

Voilà pour les dimensions relatives des anneaux brillan
des anneaux obscurs. Quant aux épaisseurs de la lame

comprise entre les verres, elles vont naturellement en croissant du centre de contact vers les extrémités ; mais si l'on cherche les valeurs qui correspondent aux anneaux des divers ordres, on trouve que ces valeurs sont entre elles *comme les nombres impairs* pour les anneaux lumineux, et *comme les nombres pairs* pour les anneaux noirs ou obscurs.

Ces lois, si simples, sont générales. Newton en inféra que le phénomène des anneaux colorés dépend de l'épaisseur variable de la lame mince interposée entre les deux verres, de la nature de la substance dont elle est composée, nullement des verres entre lesquels elle se trouve comprise. Il chercha à le rattacher à la théorie de l'émission de la lumière, en imaginant que les rayons lumineux subissent, en se propageant, des changements périodiques qui tantôt les rendent aptes à être réfléchis, tantôt les rendent aptes à être transmis. C'est la théorie connue dans la science sous le nom de théorie des accès, accès de facile réflexion, accès de facile transmission.

Aujourd'hui que la théorie des ondulations a prévalu, les anneaux colorés s'expliquent de la façon la plus simple par le principe des interférences. Un rayon de lumière qui pénètre jusqu'à la première surface de la lame est en partie réfléchi, en partie transmis jusqu'à la seconde surface, où il se réfléchit de nouveau. Les deux rayons voisins ainsi réfléchis sur chaque surface interfèrent, c'est-à-dire, comme nous l'avons vu plus haut, se détruisent ou s'ajoutent, selon que le retard du second équivaut à un nombre impair de demi-longueurs d'onde ou à un nombre pair de ces mêmes longueurs. De là, obscurité dans le premier cas, lumière, au contraire, dans le second, ou bien, anneaux obscurs, anneaux lumineux. L'analyse, appliquée à ce cas si intéressant de la théorie des ondes, fait retrouver les lois des diamètres et celles des épaisseurs, telles que Newton les constata le premier par l'expérience. Comme les longueurs d'ondes varient selon la nature de la lumière simple, et diminuent du rouge au violet, on voit que les anneaux de cette dernière couleur devaient être plus resserrés que les anneaux

rouges. Maintenant, comment cette théorie est-elle applic au phénomène des couleurs des bulles de savon, couleur variables, si mobiles et qui continuellement se mélangent e fondent les unes dans les autres? C'est encore Newton montra l'identité des anneaux colorés obtenus avec les ve et des anneaux qu'on voit apparaître sur les bulles.

Pour étudier ceux-ci, il prit soin de mettre la bulle de von soufflée à couvert de l'agitation de l'air extérieur faisant varier irrégulièrement l'épaisseur, semble pou leurs couleurs l'une dans l'autre, et empêche qu'on en pu faire le sujet d'une observation exacte. « Aussitôt, dit-il, j'en avais élevé une, je la couvrais d'un verre fort trans rent; et par ce moyen, ses différentes couleurs paraissa dans un ordre très-régulier, comme autant d'anneaux con triques qui entouraient le haut de la bulle. » Quand on p ces précautions, on voit les anneaux colorés apparaîtr sommet de la bulle, se dilatant lentement, à mesure que coulement de l'eau vers le bas de la sphère liquide rend c ci plus mince, et après être descendus jusqu'au bas, di raître chacun à son tour. La figure 250 montre la dispos de ces bandes colorées. Le phénomène, ainsi régularisé, de sa beauté aux yeux de l'artiste, mais on conçoit qu'il g en intérêt au point de vue de la science. Dans la planch on aperçoit, malgré l'irrégularité des couleurs et leur lange, les zones de plusieurs anneaux. Peu à peu la bull vient si mince au sommet, que la tache noire fait son ap tion, souvent mêlée de plusieurs taches plus petites et sombres. Presque aussitôt la sphère éclate et disparaît.

Voici, selon Newton, l'ordre exact des anneaux coloré qu'on les voit se succéder depuis la première coloration bulle jusqu'à sa disparition : Rouge, bleu; rouge, bleu; r bleu; rouge, vert; rouge, jaune, vert, pourpre; rouge, j vert, bleu, violet; rouge, jaune, blanc, bleu, noir.

Or, si l'on compare cette série avec celle des couleurs d neaux obtenus avec les deux verres de la première e

rience, on reconnaît qu'elles sont exactement rangées en ordre inverse. Et cela devait être, si c'est la même cause qui produit les mêmes effets. A l'origine, la bulle est trop épaisse pour qu'il y ait apparition de couleurs; elle est incolore. Puis, son épaisseur diminue de plus en plus, de sorte que c'est à la fin du phénomène que le noir correspondant à la plus faible épaisseur doit apparaître, exactement comme la tache noire des premiers anneaux se trouve au point où les deux verres sont en contact.



Fig. 250. — Anneaux colorés des lames minces. Bulle de savon.

Dans tout ce que nous venons de dire, il s'agit des couleurs vues par réflexion. La bulle, une fois formée, doit être observée de telle sorte qu'elle réfléchisse vers l'œil la lumière d'un ciel blanchâtre, et, pour mieux distinguer les anneaux et les couleurs, on met par derrière un fond noir. Mais on peut aussi observer la bulle de savon en regardant au travers la lumière du ciel. Des anneaux colorés se forment encore; mais ils sont d'un éclat plus faible, et leurs couleurs successives sont complémentaires de celles que donne la lumière réfléchie. Il est facile de s'assurer de ce fait, que nous avons déjà remarqué dans les anneaux obtenus à la surface de deux verres. Si, pendant qu'on regarde la bulle par la lumière des nuées réfléchie dans l'œil, la couleur de sa circonférence est rouge, au même instant un second observateur, regardant

les nuées à travers la bulle, trouvera que sa circonfére est bleue. Au contraire, si le contour de la bulle est bleu une lumière réfléchie, il semble rouge par une lumière tra mise.

Maintenant il est aisé de comprendre pourquoi la bulle savon observée à l'air libre présente dans les couleurs iri de sa surface cette irrégularité, cette mobilité, ce perpé mélange de teintes qui en fait un des plus beaux phénomè dus à la décomposition de la lumière par interférence. L'ag tion de l'air tout autour de la bulle, jointe au défaut d'hom néité de l'eau de savon en divers points, et à l'évaporation se fait d'une manière très-inégale, produit dans la pelli liquide une multitude de courants, qui, contrariant en sens l'action de la pesanteur, empêchent l'eau de descendre zones régulières vers le bas de la bulle. Son épaisseur v d'un point à un autre, et comme c'est de cette épaisseur dépend la production des divers teintes, celles-ci se ré tissent de la façon la plus variée. Au contraire, dans un fl fermé, l'air étant saturé de vapeur d'eau, l'évaporatio l'agitation de l'air n'existent plus, et les anneaux apparais avec la régularité qu'indique le calcul.

Nous oubliions de dire que les lois trouvées par Ne pour les anneaux fournissent un moyen de calculer l'ép seur de la lame liquide, dans les endroits où telle couleur paraît. C'est aux points où l'on voit les taches noires se r trer, que cette épaisseur est minimum : elle est alors env de la dix-millième partie d'un millimètre. Il résulte de là, si l'on pouvait former une bulle de savon qui n'eût pa que cette épaisseur, elle serait totalement invisible.

CHAPITRE V.

DOUBLE RÉFRACTION DE LA LUMIÈRE. — POLARISATION.

§ I. PHÉNOMÈNES DE DOUBLE RÉFRACTION DANS LES CRISTAUX A UN AXE.

Érasme Bartholin, savant médecin danois qui vivait à Copenhague vers le milieu du dix-septième siècle, ayant eu l'occasion d'examiner des cristaux qu'un de ses amis lui avait rapportés d'Islande, fut fort surpris de voir que les objets paraissent doubles, quand on les observe au travers de cette substance. C'est en 1669 qu'il constata ce singulier phénomène et qu'il en décrivit, dans un mémoire spécial, toutes les circonstances. Vingt ans après, Huygens reprenait à nouveau l'étude de ce qu'on a nommé depuis la double réfraction, en formulait les lois, et en donnait la théorie d'après les principes du système des ondulations, dont ce grand homme avait jeté les premiers fondements.

Depuis la découverte de Bartholin et les observations d'Huygens, les phénomènes de même nature ont été étudiés sous toutes leurs faces, et leur ensemble forme aujourd'hui toute une branche de l'optique. Avant de décrire les principaux d'entre eux, rappelons ce qui se passe, quand un faisceau de lumière tombe sur la surface d'un milieu transparent comme l'eau ou le verre.

En arrivant à la surface, une partie du faisceau lumineux est réfléchie régulièrement, de manière à donner une image de l'objet d'où il émane; une autre portion est réfléchie irrégu-

lièrement dans tous les sens. Voilà pour la lumière qui r
vient sur ses pas, ou, si l'on veut, qui change de route sa
changer de milieu. L'autre partie du rayon de lumière pénè
dans la substance transparente, où elle se propage sans chang
de direction, si l'incidence est normale, où elle est réfractée
le rayon tombe obliquement sur la surface. Mais dans les de
cas, le rayon reste simple ; il est simple encore, quand
sort du milieu transparent, de sorte que l'œil qui le rec
voit une image unique de la source lumineuse. Eh bien,
choses ne se passent pas toujours ainsi. Il est des substan
à travers lesquelles un rayon de lumière se comporte d'u
autre façon, où il se dédouble, et laisse voir, comme Bartho
l'a signalé pour la première fois, deux images de l'objet
lieu d'une seule.

On rencontre dans les filons et les calcaires métamorpl
ques, dans les argiles compactes, un minéral qui cristallise
forme de rhomboèdre solide à six faces parallélogrammes, tr
transparent, incolore, et dont la composition chimique indiq
un carbonate de chaux avec quelques parties de protoxy
de manganèse. C'est d'Islande que viennent les plus bea
échantillons, qui atteignent jusqu'à dix centimètres d'épa
seur : aussi le minéral dont nous parlons est-il connu sous
nom de *cristal* ou de *Spath d'Islande* (fig. 251).

Les cristaux de cette espèce se clivent avec la plus gran
facilité sur toutes leurs faces, de sorte qu'on peut leur donn
une forme rigoureusement géométrique, plus commode po
l'étude de leurs propriétés optiques. Le rhomboèdre est al
formé de six losanges égaux entre eux.

Chacun de ces losanges a deux angles obtus mesur
101° 55', et deux angles aigus de 78° 5'. Des huit angles so
des qui forment les sommets du cristal, six sont composés d
angle obtus et de deux angles aigus ; les deux autres, de tr
angles obtus. Imaginons qu'on joigne ces deux derniers
une ligne droite : cette diagonale du rhomboèdre a u
grande importance au point de vue des phénomènes qui v

nous occuper; c'est elle qu'on nomme — nous verrons bientôt pourquoi — l'*axe optique* du cristal.

Décrivons maintenant les phénomènes de double réfraction,



Fig. 251. — Échantillon de spath d'Islande.

tels qu'on les peut facilement observer à l'aide d'un échantillon de spath d'Islande.

Prenons un morceau de ce cristal. Posons-le sur une ligne d'écriture, et regardons au travers (fig. 252) : nous sommes témoin du phénomène qui avait frappé Bartholin. Chaque lettre



Fig. 252. — Images doubles des objets vus à travers un cristal de spath d'Islande.

est doublée. Notons en outre que chaque image isolée est moins noire que la lettre même : elle a pris une teinte grisâtre, et ce qui prouve que cela ne tient point à l'absorption de la lumière par le cristal, c'est que la teinte est noire partout où il y a superposition de deux images. Les arêtes du cristal lui-même vues par réfraction paraissent doubles : une ligne

droite tracée sur le papier se divise en deux lignes parallèl
Faisons tomber un faisceau de lumière solaire sur l'une d
faces; le rayon lumineux sort double, et va former sur
écran deux images différentes, dont la distance dépend
l'inclinaison du rayon incident sur la face du cristal.

Allons maintenant plus loin dans l'analyse du phénomèn
et pour cela simplifions l'expérience, c'est-à-dire n'examinc
à la fois qu'un point. Vu à travers le cristal, il paraît doub
Faisons tourner le cristal sur lui-même, parallèlement a
faces d'incidence et d'émergence. Que voyons-nous ?

L'une des images tourne autour de l'autre, et quand u
circonférence entière est décrite par le cristal, l'image
venue se placer à sa position primitive, après avoir décrit
cercle autour de l'autre image immobile.

Quand, au lieu d'observer un point, on fait la même ex
rience sur une ligne droite, on remarque que, dans deux
sitions différentes du cristal, l'une des lignes, qui semble
mouvoir parallèlement à l'autre, atteint un écart maximu
dans deux autres positions, les deux images paraissent co
cider. Mais cette coïncidence n'est qu'apparente ; car, si l
a marqué un point sur la ligne observée, on voit la dou
image de ce point, alors même que les images parall
des lignes sont superposées. Ainsi, la rotation d'une
images autour de l'autre a lieu, dans ce cas, comme dans
précédent.

Disons tout de suite qu'on donne le nom d'image *ordina*
à l'image immobile, celui d'image *extraordinaire*, à celle
exécute sa rotation autour de la première. La raison en
que le rayon réfracté qui produit l'image immobile suit d
sa route les lois de la réfraction simple, telles que les
formulées Snellius et Descartes, tandis que l'autre rayon
béit pas aux mêmes lois[1]. Cette différence caractéristique

1. En un mot, d'une part, le rayon réfracté extraordinaire n'est pas e
néral dans le plan d'incidence; d'autre part, le rapport des sinus des a
d'incidence et de réfraction ne reste pas constant.

deux images peut être mise en évidence de plusieurs manières. Qu'on fasse tomber un rayon de lumière perpendiculairement à l'une des faces du cristal, il sera bifurqué en pénétrant à l'intérieur; mais l'un des rayons suivra la direction du rayon incident, et ne sera pas réfracté non plus à son émergence : c'est le rayon ordinaire, celui qui obéit à la loi de Descartes. L'autre rayon sera dévié de la direction du rayon incident, et à son entrée dans le cristal et à sa sortie; c'est le rayon qui produira l'image extraordinaire.

Quand l'incidence est oblique, les deux rayons sont réfractés; mais le rayon ordinaire est également dévié, quelle que soit la position du cristal, pourvu que les faces d'incidence et d'émergence conservent une direction parallèle à leur direction primitive ; en un mot, sa route est celle qu'il suivrait au travers d'un morceau de verre à faces parallèles. Il n'en est pas de même de l'autre rayon, de celui qui donne lieu à l'image extraordinaire, puisque cette image, nous l'avons vu, tourne autour de la première, si l'on fait tourner le cristal parallèlement à lui-même.

Il y a dans ce mouvement de l'image extraordinaire une circonstance qu'il faut noter. Le cristal étant posé sur une feuille de papier sur laquelle on a marqué un point, supposons l'œil placé dans le plan d'incidence. Le rayon réfracté ordinaire sera aussi dans ce plan, comme l'indique la loi de réfraction simple, et l'image ordinaire O du point sera sur la trace II du plan d'incidence avec le papier (fig. 253). Mais il n'en sera pas de même de l'image extraordinaire E, et la ligne qui joint les deux images OE fera un angle avec la trace dont nous parlons. Or, on observe que cette ligne OE reste toujours parallèle, pendant le mouvement de rotation du cristal, à la bisectrice AD de l'angle obtus de la face parallèle au plan du papier. Aussi quand, grâce à ce mouvement, cette bisectrice est venue se placer parallèlement à II, l'image extraordinaire est elle-même sur cette trace, et les deux rayons réfractés se trouvent tous deux dans le plan d'incidence.

Il y a donc, parmi les sections qui coupent le cristal pe
pendiculairement à l'une de ses faces, une section telle, que
le rayon incident s'y trouve contenu, le rayon extraordina
obéira à la première loi de la réfraction simple, tout com



Fig. 253. — Positions de l'image extraordinaire par rapport au plan d'incidence. Section principale.

l'autre rayon. On nomme ce plan *section principale*. T
plan, perpendiculaire à l'une des faces du spath d'Islan
et parallèle à la petite diagonale du losange, ou à la
sectrice de l'angle obtus, est une section principale de c
face.

Toute section principale est parallèle à l'axe optique, et c

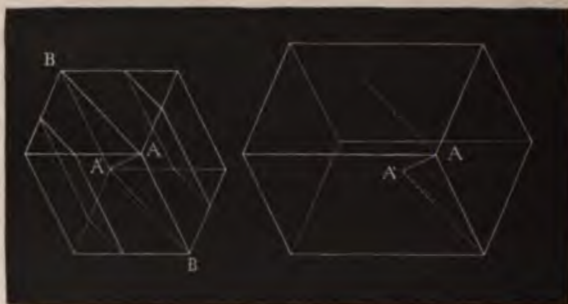


Fig. 254. — Sections principales et axe optique du spath d'Islande.

condition est suffisante; de sorte que si l'on taillait une
artificielle dans le cristal, un plan quelconque mené perpe
culairement à cette face et parallèle à l'axe optique serait
une section principale de la face artificielle. Enfin, si l'on
une face artificielle ABC perpendiculaire à l'axe optique

tout rayon tombant sur cette face sera nécessairement dans une section principale, et les deux rayons réfractés seront toujours dans le plan d'incidence. Dans ce cas, l'observation fait voir que si le rayon incident est normal à la face artificielle, il n'y a plus qu'un rayon réfracté. Voilà donc une direction pour laquelle le phénomène de la bifurcation disparaît: la double réfraction n'a plus lieu, quand le rayon incident tombe parallèlement à l'axe optique.



Fig. 255. — Section artificielle perpendiculaire à l'axe optique.

Monge a fait une expérience singulière, d'ailleurs très-facile à répéter, et qui va nous montrer quelle est la marche suivie dans le cristal par les faisceaux émanés d'un point lumineux, pour donner



Fig. 256. — Croisement des faisceaux qui produisent l'image ordinaire et l'image extraordinaire.

lieu aux deux images ordinaire et extraordinaire du point. Examinant la double image d'un point S (fig. 256), situé à quelque distance de la face inférieure, et avançant pardessous cette face une carte opaque *ab*, il reconnut avec

surprise que c'est l'image la plus éloignée de la carte qui disparaît la première. Voici comment on se rend compte du phénomène. Un faisceau lumineux incident SI se bifurque et donne deux pinceaux réfractés; d'où, à la sortie de la face parallèle, deux pinceaux émergents qui divergent, et dont l'un seul peut dès lors pénétrer dans l'œil: supposons que ce soit celui qui produit l'image ordinaire O. Un faisceau incident, voisin du premier, donnera de même deux faisceaux émergents dont l'un pénétrera dans l'œil et produira l'image extraordinaire E. Comme les faces du cristal sont parallèles, chaque faisceau émergent est composé de rayons parallèles à ceux du rayon incident. Il faut donc, puisque ceux qui produisent les images se rencontrent dans l'œil, que les faisceaux réfractés correspondants se croisent dans le cristal.

Ainsi s'explique l'expérience de Monge; la carte *ab* commence par intercepter le faisceau qui produit l'image la plus éloignée, et c'est dès lors cette image, c'est-à-dire l'image extraordinaire E, qui doit naturellement disparaître la première.

Telles sont les circonstances les plus remarquables qui constituent le phénomène de la double réfraction. Les lois qui régissent ce phénomène sont trop complexes pour que nous puissions les expliquer dans un ouvrage aussi élémentaire que le nôtre. Mais nous allons essayer de donner, en quelques lignes, une idée de la différence qui existe entre la simple et la double réfraction.

Nous avons déjà dit que le faisceau ordinaire suit les deux lois de Descartes; c'est-à-dire que le rayon réfracté est toujours dans le plan d'incidence, et que si l'on fait varier l'angle d'incidence, le rapport qui existe entre son sinus et celui de l'angle de réfraction est toujours constant. Le faisceau extraordinaire ne suit la première de ces lois, que si le rayon incident est dans une section principale. Mais il ne suit pas du tout la seconde, de sorte que le rapport des sinus, ce qu'on nomme l'indice de réfraction, varie selon l'angle que le rayon incident fait avec l'axe optique du cristal. Cet angle est-il nul,

ou, le faisceau incident est-il parallèle à l'axe optique? Dans ce cas seulement, la réfraction double disparaît; l'une des images se confond avec l'autre: il y a égalité entre les indices ordinaire et extraordinaire de réfraction. Plus l'angle croît, plus l'inégalité de ces indices va croissante, et elle est maximum, si le faisceau incident a une direction perpendiculaire à l'axe optique. Dans le spath d'Islande, le seul cristal doué de la double réfraction que nous ayons examiné jusqu'ici, l'indice de réfraction du rayon ordinaire est plus grand que celui du rayon extraordinaire. Le contraire a lieu, si l'on considère certaines autres substances bi-réfringentes, telles que le cristal de roche. A quoi tient cette différence? Pour en donner la raison, il faudrait exposer la théorie entière de la réfraction simple et double, dans le système des ondulations; montrer que la réfraction est causée par la différence de vitesse qu'éprouvent les ondes d'éther en passant d'un milieu dans un milieu plus réfringent; que le rayon ordinaire se comporte comme s'il se mouvait dans un milieu homogène non cristallisé, tandis que le rayon extraordinaire se propage avec plus ou moins de facilité, selon qu'il se meut dans telle ou telle direction relativement à l'orientation des molécules cristallines. Dans le spath d'Islande, c'est la vitesse du rayon extraordinaire qui est la plus grande; le contraire a lieu dans le cristal de roche.



Fig. 257. — Cristal de roche.

De là, le nom de cristaux *positifs* et de cristaux *négatifs* donnés aux substances qui jouissent de la double réfraction, selon qu'elles se rangent dans l'une ou dans l'autre catégorie, ayant pour type, les premières, le cristal de roche, les autres le spath d'Islande. La tourmaline, le rubis, l'émeraude sont des

cristaux négatifs; le quartz — c'est le nom minéralogiqu cristal de roche — le sulfate de potasse et de fer, l'hyposu de chaux, la glace sont au nombre des cristaux positifs.

§ II. DOUBLE RÉFRACTION DANS LES CRISTAUX A DEUX AXES.

La double réfraction se produit encore dans toute une c de substances cristallines, que l'on désigne sous le noı cristaux à *deux axes*. La topaze, l'arragonite, le sulfat chaux, le talc, le feldspath, la perle, le sucre sont des cri: à deux axes : il y a, dans chaque cristal de ce genre, directions différentes, suivant lesquelles le rayon incident sans se bifurquer; ces deux directions sont les *axes optiqu* cristal. Mais il y a une différence essentielle entre les pl mènes de double réfraction dans les cristaux à un axe, et des cristaux à deux axes. Dans les premières, l'un des rayons réfractés suit les lois de la réfraction simple; dan autres, les deux rayons sont tous deux extraordinaires : a d'eux ne suit les lois de Descartes. Une expérience de Fr démontre le fait très-simplement. On divise une topaze e sieurs fragments taillés dans différents sens; puis, après collé ces morceaux par leurs faces planes, on donne à l'ense la forme d'un parallélèpipède. En regardant alors une droite au travers, on voit deux images de la ligne, et chacu ces images est une ligne brisée dont les diverses portions c pondent aux fragments de la topaze : or, si l'un des sys de rayons réfractés suivait les lois de Descartes, l'image q résulterait serait une ligne droite, car la direction des r dans le prisme serait alors indépendante de la directio axes optiques dans chaque morceau qui le compose. L'e rience prouve donc que les deux rayons sont tous les des rayons extraordinaires. Nous verrons bientôt un moyen de distinguer les uns des autres les cristaux à ur deux axes.

Terminons ce que nous avions à dire de la double réfraction en énumérant les milieux réfringents dans lesquels les phénomènes de cet ordre ne se manifestent pas, ou qui sont doués de la réfraction simple. Ce sont d'abord les gaz, les vapeurs et les liquides. Puis, parmi les substances qui ont passé de l'état liquide à l'état solide, celles dont les molécules n'ont pas pris d'arrangement cristallin régulier : tels sont le verre, la colle, la gomme, les résines ; enfin les cristaux dont la forme primitive est le cube, l'octaèdre régulier, le dodécaèdre rhomboïdal. Il faut ajouter que les corps appartenant à ces deux dernières catégories peuvent acquérir la propriété de la réfraction double, quand on les soumet à des compressions ou dilatations violentes, ou encore, quand on chauffe inégalement leurs diverses parties. Certains solides appartenant au règne végétal ou au règne animal, la corne, la plume, la nacre sont aussi doués de la double réfraction.

§ III. POLARISATION DE LA LUMIÈRE. — POLARISATION PAR RÉFRACTION DOUBLE OU SIMPLE.

Quand on observe un objet lumineux au travers d'un cristal doué de la double réfraction, d'un rhomboèdre de spath d'Islande, je suppose, nous savons qu'on voit deux images distinctes, l'une dite ordinaire, suivant les lois de la réfraction simple, l'autre extraordinaire, dont nous avons indiqué les propriétés dans les paragraphes précédents. Cette dernière se reconnaît aisément, en ce qu'elle tourne autour de l'autre, quand on imprime au cristal un mouvement de rotation, dans un plan parallèle aux faces d'incidence et d'émergence des rayons. Il importe maintenant de remarquer que, dans toutes ces positions, l'intensité relative des deux images n'a pas varié : l'éclat de chacune d'elles est moitié moindre que celui de l'objet lumineux, comme il est aisé de le constater par l'observation directe. Supposons qu'on examine un petit cercle blanc

sur un fond noir. Partout où elles sont séparées, les de
images ordinaire et extraordinaire du point offrent une teir
grisâtre de même intensité, et l'éclat est égal à celui de l'obj
là où les deux images se superposent. Enfin, le même phén

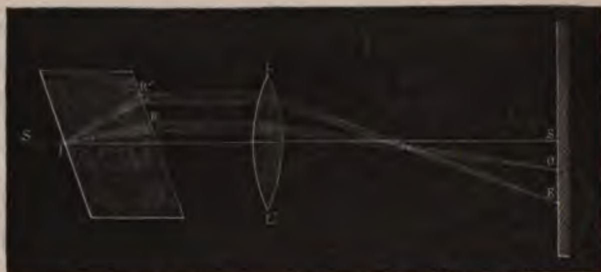


Fig. 258. — Propagation des images ordinaire et extraordinaire d'un cristal bi-réfring
Égalité d'intensité.

mène a toujours lieu, quelles que soient les couleurs respe
tives de l'objet et du fond.

On fait encore la même expérience dans les cours, en laiss
arriver un faisceau de lumière solaire sur le cristal et en r
cevant les deux faisceaux r
fractés sur une lentille conv
gente : les deux images vont
projeter sur un écran (fig. 25
Si l'on fait tourner alors le c
tal parallèlement à la face d
cidence, les deux images se
placent en décrivant chac
une circonférence de cercle
l'on voit que, dans toutes
positions, il y a égalité d
leur intensité lumineuse. Si
fait en sorte que les deux i
ges se superposent en partie, l'éclat des parties superpo
sera double de celui que possèdent les parties séparées, com
on le voit dans la figure 259.

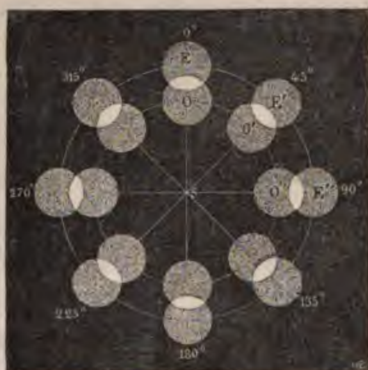


Fig. 259. — Égalité de l'intensité des images ordinaire et extraordinaire dans la double réfraction.

Une belle et ancienne expérience, due à Huygens, va r

prouver que les faisceaux qui émergent du spath d'Islande ont acquis de nouvelles et remarquables propriétés, après leur déviation dans le milieu cristallisé, propriétés que n'avait point le faisceau lumineux avant son passage à travers le cristal. Cette expérience consiste à recevoir, après leur sortie du premier rhomboèdre, les rayons ordinaire et extraordinaire sur un second cristal, et à examiner les intensités relatives des images qui en résultent, quand on fait varier l'orientation du second cristal autour de chaque faisceau émergent. Voici un moyen très-simple d'observer les phénomènes qui se produisent : c'est, du reste, celui qu'a employé Huygens lui-même.

Plaçons un premier cristal sur un point noir au milieu d'un fond blanc. Il y aura deux images d'égale intensité. Posons maintenant un second spath d'Islande sur le premier, et plaçons-le de façon que leurs sections principales coïncident; un des moyens de réaliser cette condition est de placer les faces de l'un parallèlement aux faces de l'autre : il n'y aura toujours que deux images, de même intensité qu'auparavant. Seulement les deux images, ordinaire et extraordinaire, seront plus séparées qu'avec un seul cristal. La même chose aurait lieu, pourvu que les sections principales des deux rhomboèdres restassent dans le même plan ou dans des plans parallèles, quand même les deux faces en regard des cristaux ne conserveraient pas leur parallélisme; et il n'est pas nécessaire non plus que, dans la première position, les deux rhomboèdres se touchent.

Voilà donc déjà une première différence entre le rayon lumineux, avant sa réfraction dans le spath d'Islande, et chaque rayon émergent ordinaire ou extraordinaire : tandis que le premier se bifurque en pénétrant dans le cristal, il semble que chacun des deux autres reste simple, en pénétrant dans le second cristal. Poursuivons notre étude.

Faisons maintenant tourner lentement le cristal supérieur, de façon que la section principale fasse avec celle du premier,

des angles de plus en plus grands. On va voir alors appar
quatre images; chacune des deux premières sera dédoub
mais sans conserver l'égalité d'intensité qui caractér
celles-ci. De ces quatres images, disposées aux sommets
losange à côtés constants, mais à angles variables, deux
viennent de la double réfraction, dans le cristal supérieur
rayon ordinaire émergent; les deux autres proviennen
la double réfraction du rayon extraordinaire. Mais, différ

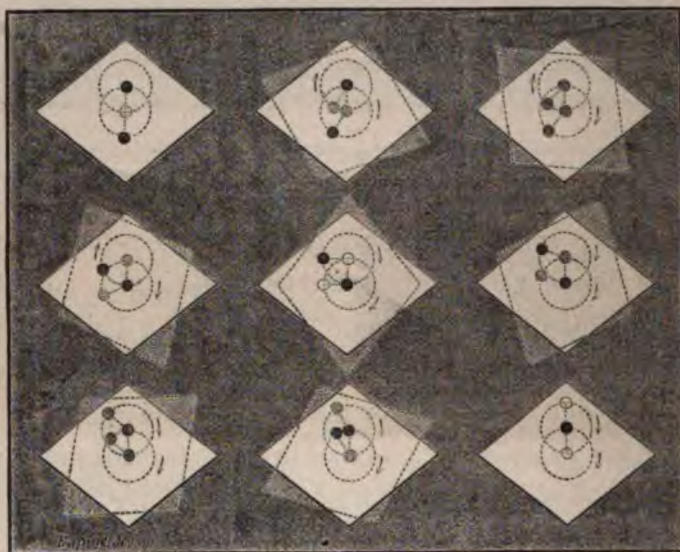


Fig. 260. — Expérience d'Huygens. Variations d'intensité des images provenant de
faisceaux polarisés par double réfraction.

importante à signaler, en général chaque couple est car
risé par une différence dans l'intensité lumineuse des im
La figure 260 représente leurs positions et leurs inten
relatives pour des angles, compris entre 0° et 180°, des sec
principales de deux cristaux. Si les sections principales s
angle droit, on ne voit plus que deux images; si elles
un angle de 180°, il en est de même, à moins que, les cris
ayant la même épaisseur, les deux images se superposent;
ce dernier cas, les déviations opérées par chaque crist
faisant en sens opposés, on n'a plus qu'une image unique

Il résulte déjà de cette première expérience que tout rayon de lumière qui a traversé un cristal doué de la double réfraction ne jouit plus, après son passage, des mêmes propriétés dans tous les sens ; dans certaines directions, il n'est plus susceptible de subir une nouvelle bifurcation, et dans les autres, les deux faisceaux dans lequels il se divise n'ont plus même intensité lumineuse. Pour caractériser ces propriétés nouvelles, on dit que la lumière qui a traversé un cristal bi-réfringent est de la *lumière polarisée.*

Mais il est important de préciser les phénomènes que nous venons de décrire. Pour cela, supposons qu'on fasse arriver sur un premier cristal de spath d'Islande, dont la section prin-



Fig. 261. — Polarisation du rayon ordinaire par double réfraction.

cipale est verticale, un faisceau de lumière solaire, SI (fig. 261). Ce faisceau se divise, dans le plan de la section, en deux faisceaux, l'un ordinaire IR, l'autre extraordinaire IR'. Interceptons l'un des deux par un écran, et laissons passer l'autre à travers un second spath d'Islande ; en général le faisceau lumineux, en traversant le second cristal, subira la double réfraction : il se partagera en deux faisceaux, $I_1'R_1$ qui est le faisceau ordinaire, et $I'_1R'_1$, qui est le faisceau extraordinaire. Enfin, à l'aide d'une lentille, projetons les faisceaux émergents sur un écran. Voyons ce qui arrivera, si l'on fait tourner le second cristal de manière à faire faire à sa section principale tous les angles possibles avec celle du premier, de 0° à 360°. La figure 262 montre quelles sont les intensités relatives des

deux images, si c'est le rayon ordinaire émergent du premi
cristal qui a traversé le second ; la figure 263 montre au co
traire ce que sont ces intensités, quand on laisse passer da
le second spath d'Islande le rayon extraordinaire émergé
premier.

En résumé, un faisceau de lumière naturelle est entré da
le premier spath d'Islande où il subit la double réfraction,
chacun des faisceaux qui en sort a des propriétés partic
lières que l'on caractérise en disant qu'il est *polarisé*: po
cette raison, le premier cristal reçoit le nom de *polariseur*.



Fig. 262. — Dédoublement du rayon ordinaire. Intensités variables des images du faisceau polarisé.



Fig. 263. — Dédoublement du rayon ext dinaire. Intensités des images du fais polarisé.

second cristal a servi à analyser les propriétés qu'a fait acqu
à chaque faisceau la polarisation; c'est le cristal *analyse*

Le rayon *ordinaire*, en passant dans l'analyseur, se divise
deux rayons dont l'intensité varie selon l'angle que fait la
tion principale du second cristal avec celle du premier, et
donne deux images, l'une ordinaire, l'autre extraordina
Si cet angle est 0° ou 180°, l'image ordinaire existe seule
l'intensité maximum, l'image extraordinaire a disparu ; à
ou 360°, l'image extraordinaire a le maximum d'éclat, l'a
a disparu. Pour des positions intermédiaires, où la seco
section principale forme avec la première des angles de
les deux images ont même intensité. Enfin, dans les au

positions relatives des sections principales des cristaux, il y a inégalité d'intensité dans l'une ou l'autre des images. On dit alors que le rayon ordinaire est *polarisé* dans le plan de la section principale, et c'est à ce plan qu'on donne le nom de *plan de polarisation*. Maintenant, comme le second rayon, le rayon extraordinaire éprouve les mêmes modifications en passant dans l'analyseur, avec cette différence essentielle qu'il y a toujours une différence de 90 degrés dans les positions relatives des sections principales, on dit qu'il est *polarisé* dans un plan perpendiculaire au premier plan de polarisation. Son plan de polarisation fait un angle droit avec la section principale du cristal polariseur. En un mot, les deux rayons, ordinaire et extraordinaire, provenant d'un rayon de lumière naturelle qui a subi une double réfraction, sont polarisés à angle droit.

La polarisation par double réfraction, telle que nous venons de l'étudier dans le spath d'Islande, se produit de la même manière avec tous les cristaux bi-réfringents. Mais, il n'est pas toujours facile de l'observer, à cause de la faible séparation des faisceaux ordinaires et extraordinaires. Avec le spath lui-même, il faut des cristaux d'une certaine épaisseur, pour qu'on puisse intercepter facilement l'un d'eux avec un écran. Aussi a-t-on imaginé, pour obtenir cette séparation des faisceaux polarisés, des appareils plus commodes, parmi lesquels nous décrirons le *prisme de Nicol*.

Le prisme de Nicol consiste en un long cristal de spath d'Islande qui a été scié en deux, selon un plan perpendiculaire à la section principale. Les deux fragments, replacés dans leur position primitive, sont collés au moyen d'une couche de baume du Canada. L'indice de réfraction de cette substance est intermédiaire entre les deux indices de réfraction du spath d'Islande correspondant, l'un au rayon ordinaire, l'autre au rayon extraordinaire. Il résulte de là, comme on le démontre rigoureusement et comme l'expérience le confirme, que si

un rayon de lumière pénètre dans le sens de la longueur d
cristal et s'y partage en deux par la double réfraction, le rayo
ordinaire éprouve la réflexion totale à la surface du baum
de Canada, tandis que le rayon extraordinaire passe seul da
la seconde moitié du cristal et émerge par la face opposée.

Supposons qu'on emploie deux prismes de Nicol pour rép
ter l'expérience d'Huygens. Il est clair qu'on n'obtiendra j
mais que deux images, celles qui proviennent du rayon éme
gent, c'est-à-dire du rayon extraordinaire polarisé par
premier prisme. Si les sections principales des deux prism
sont parallèles, l'une des deux images, l'ordinaire, est null
l'autre, l'extraordinaire, a son maximum d'éclat; si les sectio
principales sont à angle droit, toutes les deux disparaissen
puisque l'image ordinaire qui devrait avoir une intensi
maximum subit la réflexion totale, et que l'image extraord
naire a une intensité nulle. Le premier prisme, celui qui r
çoit le rayon de lumière naturelle est le *nicol polariseur*, l'a
tre est le *nicol analyseur*.

Cette propriété du prisme de Nicol de ne laisser passer q
le rayon extraordinaire appa
tient aussi à un cristal nature
la tourmaline, qui, sous u
certaine épaisseur, absorbe fo
tement le rayon ordinaire. C'e
M. Biot qui a découvert, e
1815, cette propriété rema
quable : elle va nous permett
de donner d'après J. Hersche
un nouvel exemple de la pol
risation de la lumière par do
ble réfraction. « Quand,
l'aide d'une roue de lapidair
on a clivé un prisme de tourmaline en lames parallèles
l'axe, et d'une épaisseur uniforme d'environ un vingtièn
de pouce (1mm 27), on donne à ces lames le poli conv



Fig. 264. — Échantillon de tourmaline de Sibérie.

nable. Alors les objets lumineux paraissent au travers, comme si on les regardait avec un verre coloré. Concevons une de ces lames interposée perpendiculairement entre l'œil et une chandelle : celle-ci sera vue avec une égale facilité dans toutes les positions de l'axe de la lame à l'égard de l'horizon. Si l'on fait tourner la lame dans son propre plan, on ne remarque aucun changement dans l'image de la chandelle. Donnant alors à cette première lame une position fixe (en plaçant son axe verticalement par exemple), on interposera entre elle et l'œil une seconde lame qu'on fera tourner lentement dans son propre plan ; ce qui produira un phénomène très-curieux. La chandelle deviendra successivement visible et invisible à chaque quart de révolution de la lame, en passant par tous les degrés de clarté, depuis un certain maximum jusqu'à une obscurité totale ou presque totale; après quoi la clarté augmentera de la même manière qu'elle aura décru. Or, si l'on fait attention à la position de la seconde lame par rapport à la première, on trouvera que les maxima de clarté ont lieu lorsque les axes sont parallèles, c'est-à-dire lorsqu'ils sont disposés comme ils l'étaient ordinairement dans le cristal, ou lorsque leurs positions diffèrent de 180°. Les minima ont lieu, au contraire, lorsque les axes se croisent exactement à angles droits. Dans cette dernière situation, la lumière est totalement arrêtée, si la tourmaline est d'une bonne couleur, et quoique chaque lame en particulier soit d'une transparence parfaite, leur combinaison est tout à fait opaque. » (Herschel, *la Lumière*.)

Ainsi, comme on voit, la faisceau de lumière naturelle qui a traversé une première lame de tourmaline se trouve polarisé, comme celui qui émerge d'un cristal de spath d'Islande. Il n'a plus sur tous ses côtés, sur toutes ses faces, si l'on peut s'exprimer ainsi, les mêmes propriétés, du moins au point de vue de son éclat. Nous allons voir maintenant que la double réfraction n'est pas le seul moyen de transformer la lumière naturelle en lumière polarisée.

En 1808, Malus, physicien français, qui s'est illustré ses beaux travaux sur l'optique, regardant par hasard, à vers un cristal de spath d'Islande, l'image du soleil couc réfléchie par les vitres du palais du Luxembourg, remai avec surprise qu'en faisant tourner le prisme, les deux im changeaient d'intensité : la plus réfractée était alternativei plus ou moins brillante que l'autre, à chaque quart de rév tion. En analysant minutieusement ce phénomène, il dé vrit que la réflexion sous certains angles suffit pour donne rayon lumineux les mêmes propriétés que possède un r qui a traversé un cristal biréfringent tel que le spath d'Isla L'expérience d'Huygens, dont Huygens et Newton ava essayé en vain de donner la théorie, ne fut plus un phénoi isolé, et c'est en s'efforçant de les rattacher à une même e cation déduite de la théorie de Newton, que Malus fut coi à donner le nom de polarisation de la lumière à la mc cation subie par les rayons lumineux dans les expérie rapportées plus haut. Trois ans plus tard, en 1811, Malus, et Brewster découvraient séparément la polarisation pai fraction simple, Arago, la polarisation chromatique; et de une multitude de faits nouveaux, se rattachant à des mc cations singulières des rayons lumineux, vinrent conce avec les phénomènes dont nous venons de parler, à fo une des plus intéressantes branches de la science, auss conde pour la théorie que pour ses applications prati Comme les bornes et la nature élémentaire de cet ouvraç nous permettent pas d'entrer dans de longs détails, nous contenterons de décrire quelques-uns des plus remarqu parmi ces phénomènes.

§ IV. POLARISATION PAR RÉFLEXION.

Quand un faisceau de lumière naturelle tombe obl ment sur un miroir non métallique, de verre noir, de ma

d'obsidienne, il acquiert, par la réflexion à la surface, les mêmes propriétés que s'il eût été traversé par un cristal doué de la double réfraction : il est *polarisé*.

On pose sur une table, devant une fenêtre ouverte, une plaque de verre noir, puis on se place de manière à recevoir obliquement, sous une inclinaison d'environ 35°, la lumière des nuées réfléchie par la plaque. L'éclat du miroir paraît alors uniforme. Si, sans changer alors de position, on observe la surface brillante à travers une lame de tourmaline, taillée parallèlement à son axe optique, et si l'on fait tourner cette lame dans son propre plan, on remarque, dans l'éclat de l'image des nuées formées sur la plaque de verre, les variations suivantes : si l'axe de la tourmaline est dans un plan vertical, l'image brillante disparaît ; la plaque de verre semble couverte d'une sorte de nuage obscur, et le centre de la tache est entièrement noir. Quand cet axe est, au contraire, horizontal, c'est-à-dire parallèle à la plaque de verre, la tache disparaît complétement ; enfin, dans les positions intermédiaires de l'axe de la tourmaline, l'éclat de l'image va graduellement en s'éclaircissant de la première situation à la seconde.

Si l'analyseur, au lieu d'être une lame de tourmaline, est un prisme de Nicol, les variations d'éclat de l'image se succéderont de la même manière : le minimum aura lieu, quand la section principale du prisme sera verticale, et le maximum, quand cette section sera à angle droit avec la première de ses positions.

De ces deux expériences on tire la conclusion qu'un faisceau lumineux, tombant sous une inclinaison de 35° 25′ (ou ce qui est la même chose, sous une incidence de 54° 35′), sur une plaque de verre noir, est, après sa réflexion, polarisé dans le plan même de cette réflexion. Cet angle de 54° 35′ est ce qu'on nomme l'angle de polarisation du verre : c'est celui pour lequel le rayon réfléchi peut être complétement éteint par le polariscope analyseur : c'est ce qu'on exprime en disant qu'il est complétement polarisé. Quand l'angle d'incidence a une

autre valeur, l'image du faisceau n'est pas complétemei éteinte : le rayon réfléchi est partiellement polarisé.

L'angle de polarisation varie avec les substances réfléchi: santes. Ainsi, il est de 52° 45′ pour l'eau, de 56° 3′ pour l'ol sidienne, de 58° 40′ pour la topaze, de 68° 2′ pour le dia mant. Brewster a imaginé une très-curieuse expérience poı mettre en évidence la différence que nous signalons entı les angles de polarisation de deux substances, du verre ı de l'eau par exemple. Il dispose une plaque de verre, de faç qu'elle reçoive et réfléchisse un faisceau de lumière soı l'incidence de 54° 35′, qui est, comme nous venons de le voi l'angle de polarisation du verre. Puis, il observe le faisceɛ réfléchi avec un analyseur de manière que toute lumiè disparaisse. Or, si à ce moment, une personne souffle av son haleine sur la plaque de verre, l'image apparaît de no veau. Ce phénomène est dû à ce qu'alors la réflexion a li sur une couche d'eau, et que l'angle de polarisation de l'e n'est pas le même que celui du verre.

Malus a imaginé un appareil à l'aide duquel toutes les pr priétés de la lumière polarisée par réflexion peuvent être ét diées. Outre celles que nous venons de décrire, nous signal rons encore celles qui caractérisent cette lumière, quand e se réfléchit en tombant sur une seconde plaque réfléchissan La figure 265 représente l'appareil de Malus, modifié et pe fectionné par M. Biot. I est la plaque polie destinée à polari: le rayon de lumière SI, par sa réflexion sur la surface de plaque; on voit ensuite un tube noirci au dedans, muni diaphragmes, et suivant l'axe duquel passe le rayon réfléı et polarisé II′.... En sortant du tube, le rayon tombe sur u plaque I′ en verre noir, s'y réfléchit de nouveau, et va, s tomber dans l'œil, soit former une image sur un écran Les cadres qui maintiennent les deux plaques réfléchissan peuvent tourner autour d'un axe perpendiculaire à celui tube, de manière que leurs plans puissent faire avec ce dı nier tous les angles possibles; de plus, on peut faire tourı

chaque plaque dans une de ses positions, autour de l'axe même du tube; de sorte qu'en définitive, pour une incidence donnée du rayon lumineux sur la première plaque, on peut faire varier à volonté et l'angle d'incidence du rayon polarisé sur l'autre plaque, et l'angle du second plan de réflexion avec le premier.

On trouve, à l'aide de cet appareil, que le maximum



Fig. 265. — Polariscope de Malus perfectionné par M. Biot.

d'éclat de l'image a lieu, quand les deux plans de réflexion coïncident, et le minimum, quand ces deux plans sont à angle droit. De plus, le rayon est complétement éteint, quand l'angle d'incidence sur chacun des deux miroirs est de 35° 25′, pourvu toutefois que le faisceau n'ait pas une intensité trop vive, comme dans le cas où c'est de la lumière solaire.

Brewster a découvert une loi fort simple, qui existe entre

l'angle de polarisation et l'indice de réfraction de la substance polarisant la lumière par réflexion, de sorte que l'un de ces éléments étant connu, on peut en déduire l'autre. Cette loi est l'expression de la relation géométrique suivante : *Le rayon réfléchi* IR (fig.266), *polarisé sous l'angle de polarisation, et le rayon réfracté* Ir *forment un angle droit.*

La réfraction simple polarise aussi la lumière. C'est ce que Malus, Biot et Brewster ont découvert, chacun de leur côté, en 1811. Ce phénomène peut se constater à l'aide de l'appareil de Biot (fig. 265), où la glace I a été remplacée par un prisme de verre. Si l'on tourne le prisme, de façon que le rayon en sorte perpendiculairement à la face d'émergence, on trouve, en faisant tourner l'analyseur I', que le faisceau après sa réflexion offre des maximum et des minimum d'intensité, mais assez peu prononcés. La lumière est donc partiellement polarisée. Comme le maximum d'éclat à lieu, quand le plan d'incidence sur l'analyseur est perpendiculaire au plan d'incidence sur le prisme, on voit que le plan de polarisation est, dans ce cas, perpendiculaire au plan de réfraction.



Fig. 266. — Relation entre le rayon polarisé sous l'angle de polarisation d'une substance et le rayon réfracté. L'angle RIr est droit.

On obtient un faisceau complétement polarisé par réfraction simple, en lui faisant traverser successivement plusieurs lames de verre parallèles sous l'angle de 35° 25', qui est, nous l'avons vu, l'angle de polarisation du verre. Ces lames minces, très-polies, doivent être appliquées les unes sur les autres, mais sans adhérer complétement, de façon qu'une mince couche d'air reste interposée entre deux plaques successives : l'appa-

reil ainsi disposé se nomme *pile de glaces;* on s'en sert comme polariscope en le mettant, dans l'appareil de Biot, à la place de la glace I'.

Nous ne nous étendrons pas davantage sur cette classe si curieuse de phénomènes, dont la description détaillée nous entraînerait trop loin, et qui d'ailleurs, pour être bien compris, exigeraient des développements théoriques difficiles. Nous avons voulu seulement initier le lecteur aux faits fondamentaux, à ceux dont la découverte a éte le point de départ de cette branche si importante de l'optique moderne.

§ V. COULEURS DE LA LUMIÈRE POLARISÉE.

« En examinant, par un temps serein, une lame assez mince de mica, à l'aide d'un prisme de spath d'Islande, je vis que les deux images qui se projetaient sur l'atmosphère n'étaient pas teintes des mêmes couleurs : l'une d'elles était jaune verdâtre, la seconde rouge pourpre, tandis que la partie où les deux images se confondaient était de la couleur du mica vu à l'œil nu. Je reconnus en même temps qu'un léger changement dans l'inclinaison de la lame par rapport aux rayons qui la traversent, fait varier la couleur des deux images, et que si, en laissant cette inclinaison constante et le prisme dans la même position, on se contente de faire tourner la lame de mica dans son propre plan, on trouve quatre positions à angle droit où les deux images prismatiques sont du même éclat et parfaitement blanches. En laissant la lame immobile, et faisant tourner le prisme, on voyait de même chaque image acquérir successivement diverses couleurs, et passer par le blanc après chaque quart de révolution. Au reste, pour toutes ces positions du prisme et de la lame, quelle que fût la couleur d'un des faisceaux, le second présentait toujours la teinte complémentaire, en sorte que, dans les points où les deux images n'étaient point séparées par la double

réfraction du cristal, le mélange de ces deux couleurs forma du blanc. »

C'est en ces termes qu'Arago décrit, dans un Mémoire lu l'Académie des sciences le 11 août 1811, l'expérience qui fi pour lui le point de départ d'une série de découvertes, sur l phénomènes de coloration de la lumière polarisée. Il reconn immédiatement que la lumière transmise par la lame de mi était de la lumière polarisée par réflexion sur les couch atmosphériques ; par un temps couvert, quand la lumière q vient des nuées a les caractères de la lumière naturelle, l deux images vues à travers la lame de mica n'offrent aucu trace de coloration. Ainsi, pour que le phénomène se produis il faut que la lumière qui traverse la lame cristallisée ait é préalablement polarisée. Cette condition fut mise hors de dou par Arago au moyen de plusieurs expériences dans lesquell il recevait sur la lame de mica des rayons réfléchis par miroir de verre noir : il remarqua, alors, que les couleurs d deux images observées avec le spath d'Islande étaient d'auta plus vives que la lumière avait été réfléchie sous un ang plus voisin de l'angle de polarisation du verre.

Toutes les substances biréfringentes, taillées en lam minces parallèlement à l'axe, jouissent de la même propri de colorer la lumière polarisée qui les traverse ; ainsi, on p employer des lames de gypse (sulfate de chaux), de cris de roche, de spath d'Islande. Mais les épaisseurs de ces la qui donnent les couleurs varient d'une substance à l'autre, pour chacune d'elles, on n'obtient d'images colorées que cette épaisseur est comprise entre certaines limites. Ainsi u lame de sulfate de chaux doit avoir plus de $0^{mm}425$ et mo de $1^{mm}27$ d'épaisseur ; une lame de mica, moins de $0^{mm}08$ une lame de cristal de roche, moins de $0^{mm}45$. Il est diffi d'obtenir des couleurs avec le spath d'Islande, parce l'épaisseur de la lame ne doit pas dépasser la quarantiè partie d'un millimètre.

L'inclinaison de la lame sur la direction des rayons polari

influe sur les couleurs, qui varient rapidement quand cette inclinaison varie. Enfin, l'épaisseur, pour une même inclinaison de la lame et une même position du prisme, influe aussi sur les couleurs des images, et M. Biot a trouvé que les lois de variation de ces nuances sont précisément celles que Newton a trouvées pour les anneaux colorés des lames minces, obtenus par la superposition de deux lentilles; mais les épaisseurs des lames biréfringentes, qui correspondent aux couleurs des divers ordres de Newton, sont beaucoup plus considérables que celles de la lame d'air comprise entre les lentilles.

On se sert de cette propriété du changement de couleur des images avec l'épaisseur pour produire des effets variés et curieux. Si, après avoir collé sur du verre une lame de gypse, on y creuse une cavité de forme sphérique à grand rayon, et qu'on l'observe dans l'appareil de Biot, de sorte que la lumière qui arrive à l'œil après avoir traversé la lame de gypse et l'analyseur ait été préalablement polarisée, on aperçoit une série d'anneaux colorés concentriques, comme ceux qu'on voit autour du point de contact de deux lentilles. En gravant en creux sur la lame divers objets, des fleurs, des insectes, des papillons, on peut calculer les profondeurs de la gravure, aux divers points, de manière à reproduire les couleurs vives et variées des objets naturels. « Autrefois, on faisait mieux, disait récemment M. Bertin dans une intéressante conférence sur la polarisation, on profitait de la circonstance pour rendre hommage à l'auteur de ces belles expériences. Au milieu d'une couronne de feuillage apparaissait le nom d'Arago avec la date de sa découverte. Du vivant du grand homme, c'était peut-être une flatterie; mais maintenant qu'il n'est plus, la suppression de cette expérience (dans les cours de physique) est un acte d'ingratitude : nous oublions nos morts pour courir après les papillons »

Il serait juste de joindre au nom d'Arago celui de Brewster qui a fait de son côté, et à la même époque, à peu près les

mêmes découvertes, et à qui l'on doit notamment celle d anneaux colorés dans les cristaux à un et à deux axes.

Avant d'entrer dans quelques détails sur ces phénomèn remarquables, disons que le verre qui, à l'état ordinaire, n'e pas susceptible de donner les couleurs observées dans les lam cristallisées, acquiert cette propriété par la trempe, par flexion et la compression, et par l'acti de la chaleur. Les figures 267 et 268 mo trent quelques-unes des apparences offe tes dans ces diverses circonstances par d plaques de verre d'une certaine épaisseu et de forme rectangulaire ou carrée. C'e à Seebeck (1813) qu'on doit la découver de ces phénomènes, de même nature q ceux dont nous venons de donner la de cription. Voici encore une expérience cu rieuse de Biot, rapportée par M. Dagu dans son *Traité de Physique*: « Ce sava ayant excité des vibrations longitudina dans une bande de verre de 2 mètres longueur placée entre le polariscope et polarisateurs de son appareil, disposé po donner l'obscurité, vit, à chaque frictio jaillir une vive lumière, dont l'éclat et couleur dépendaient du mode de frott ment et de son énergie. »

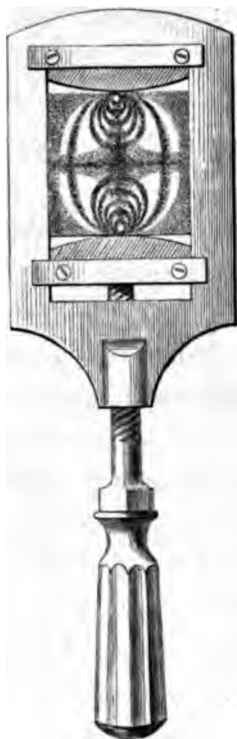


Fig. 267. — Couleurs de la lumière dans le verre comprimé.

Les couleurs de la lumière polari produites par le passage d'un faisceau de cette lumière à t vers une lame mince cristallisée, dépendent, ainsi que no l'avons vu plus haut, de l'épaisseur de la lame : elles vari si cette épaisseur varie elle-même. Mais pour une même épa seur, la teinte est uniforme, parce que tous les rayons composent le faisceau sont parallèles, et dès lors parcouren même espace à l'intérieur de la lame.

Si, au lieu d'un faisceau, c'est un pinceau conique de

mière polarisée qu'on reçoit sur la lame, de façon que l'axe du cône soit perpendiculaire à la surface de celle-ci, il est clair que les rayons parcourront, à l'intérieur du cristal, des chemins d'autant plus longs qu'ils seront plus éloignés de l'axe, et la teinte que prendra la lame observée à l'aide d'un analyseur ne sera plus uniforme. On voit alors des systèmes d'anneaux colorés dont la forme et les teintes varient selon qu'il s'agit d'un cristal à un ou à deux axes optiques, et selon



Fig. 268. — Couleurs de la lumière polarisée dans le verre trempé.

la position du polariscope par rapport au plan de polarisation. Voici comment on procède pour obtenir ces beaux phénomènes, en partie reproduits dans la planche VIII.

On prend une pince à tourmaline (fig. 269). Cet instrument consiste en deux anneaux métalliques, qu'un ressort en forme de pince presse l'un contre l'autre, et dans chacun desquels se trouve enchâssée une plaque de tourmaline : chaque plaque peut tourner dans son anneau, de sorte qu'on peut donner à volonté toutes les positions angulaires possibles aux axes des deux cristaux biréfringents. On interpose entre les deux anneaux la plaque mince cristallisée, de spath d'Islande par exemple, fixée à un disque de liége que la pression des anneaux maintient entre les tourmalines. On n'a qu'à regarder

alors la lumière du ciel à travers le système des trois la pour apercevoir les anneaux colorés. La lame de tourmal tournée vers le ciel, polarise la lumière des nuées, qui, a avoir traversé cette première plaque, converge vers l'œil passant par la lame de spath et la seco tourmaline.

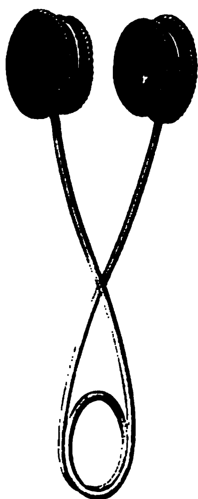


Fig. 269. — Pince à tourmaline.

Supposons qu'on ait disposé d'abord deux tourmalines de manière que leurs soient perpendiculaires : le plan primiti polarisation est alors parallèle à la sec principale de la tourmaline qui sert de lariscope. On voit alors une série d'anne concentriques irisés, traversés par une c noire (Planche VIII, fig. 1). Si l'on fait a tourner le polariscope de 90°, les axes tourmalines seront parallèles, et la sec principale du polariscope sera à angle d avec le plan de polarisation. La croix n se trouve alors remplacée par une c blanche, et les anneaux irisés présentent, aux mêmes tances du centre, des couleurs complémentaires de c qu'ils affectaient dans la première expérience (Planche fig. 3). Dans les positions intermédiaires des axes des t malines, on passe graduellement de la première appar à la seconde : si les axes sont inclinés de 45°, on obtie figure 2 de la planche VIII.

Tels sont les phénomènes, quand on se sert de la lum blanche. Si l'on s'était servi de lumière homogène, de lum jaune par exemple, on eût obtenu des anneaux alternati ment brillants et noirs, traversés par des croix semblabl celles qu'on vient de voir dans les expériences précéde les anneaux brillants étant de couleur jaune. Les anneau même ordre seraient, si l'on employait les diverses coul du spectre, d'autant plus grands que ces couleurs sont réfrangibles. Voilà pourquoi les anneaux sont irisés ave

lumière blanche, et pourquoi le violet occupe, dans ce cas, le bord extérieur de chaque anneau dans la première position du polariscope.

C'est en 1813 que Brewster découvrit les anneaux colorés produits par la lumière polarisée, quand elle vient à traverser, en convergeant, des lames minces de cristaux biréfringents : il les vit d'abord dans le rubis, l'émeraude, la topaze, la glace, le nitre, et plus tard le docteur Wollaston les observa dans le spath d'Islande. En étudiant ces phénomènes dans les différentes substances cristallisées, Brewster arriva à distinguer les cristaux biréfringents en deux classes, celle des cristaux à un axe, et celle des cristaux à deux axes. Voici comment : tandis que dans le rubis, l'émeraude, le spath par exemple, il n'aperçut qu'un simple système d'anneaux colorés, dans le nitre, la topaze, taillés suivant une certaine direction et observés à travers la pince à tourmaline, etc., il observa un double système d'anneaux, alternativement noirs et brillants, si la lumière polarisée qui les traverse est homogène, et irisés, si cette lumière est blanche. C'est ce phénomène qui fit découvrir à Brewster les cristaux biréfringents à deux axes.

Pour observer les anneaux dont il s'agit, on taille une lame de nitre par exemple, perpendiculairement à la ligne moyenne des deux axes, et on l'interpose entre les anneaux de la pince à tourmaline. On aperçoit alors l'une des figures 4, 5 et 6 de la planche VIII. La figure 6 correspond au cas où le plan des axes de la lame de nitre est parallèle au plan primitif de polarisation; la figure 4 à celui où ces plans font un angle de 45°; enfin la figure 5 représente les anneaux donnés par la position intermédiaire. Au delà de 45° jusqu'à 90°, on retrouve les mêmes apparences, et il en est de même dans chaque angle droit, si l'on continue à faire tourner sur elle-même la plaque de nitre. Avec la lumière homogène, on obtient des anneaux alternativement noirs et brillants, ces derniers étant de la couleur de la source.

Si, en laissant la lame fixe entre les deux tourmalines, on

fait tourner le polariscope ou analyseur, c'est-à-dire la t maline voisine de l'œil, les anneaux, sans changer de posi changent peu à peu de couleur, et quand la rotation est d ou de 270°, ces couleurs sont devenues les complément de celles que donnaient les anneaux dans les mêmes posi de la lame : les croix noires ont été remplacées par des blanches.

Nous nous arrêterons là dans la description des phénom que produit la lumière polarisée, phénomènes des plus i ressants, et dont l'énumération seule exigerait de longues p Le but que nous nous sommes proposé en abordant cette p de l'optique est beaucoup plus, nous l'avouons, d'excit curiosité du lecteur, et de l'engager ainsi à entreprendre étude plus complète, que de lui donner une idée nette causes de ces phénomènes, c'est-à-dire de montrer q explication reçoivent ceux-ci dans la théorie des ondulat Nous ne pouvons nous empêcher cependant de résume quelques lignes les importants progrès que la théorie a f sous l'impulsion des découvertes qui se sont succédé si dement au commencement de notre siècle.

Nous avons vu dans un chapitre précédent que les ph mènes lumineux sont dus au mouvement vibratoire du m élastique qu'on nomme éther. Les phénomènes d'interfér inexplicables dans le système de l'émission, trouvent au traire dans l'hypothèse des ondulations une explicatio plus simples et des plus satisfaisantes ; mais elles n'appren rien sur le sens dans lequel ont lieu les vibrations de l'é On pouvait supposer avec une égale vraisemblance qu oscillations d'une molécule s'effectuent, soit dans le se la propagation de la lumière, soit dans une direction parall la surface des ondes, ou perpendiculaire au rayon lumi soit enfin dans une direction quelconque oblique à ce ra

Mais en adoptant la première hypothèse, celle qui assi pour ainsi dire les ondes lumineuses aux ondes sonores, il

impossible de rendre compte de la transformation que subit un rayon lumineux, quand il a traversé un milieu biréfringent, ou qu'il s'est réfléchi sous un certain angle à la surface d'un corps poli. Pourquoi, si les vibrations étaient longitudinales, le rayon polarisé aurait-il, dans certains plans, des propriétés particulières? Pourquoi ces propriétés appartiendraient-elles exclusivement à certains côtés du rayon? Ces objections portaient une grave atteinte à la théorie des ondulations, quand Fresnel eut l'idée de substituer à l'hypothèse des vibrations longitudinales, celle des vibrations transversales perpendiculaires à la direction de la propagation lumineuse. Un rayon de *lumière naturelle* est alors celui dans lequel les mouvements vibratoires s'effectuent successivement dans tous les sens à la surface de l'onde, ses propriétés doivent donc être les mêmes de tous les côtés. Mais si ce rayon vient à traverser un polariseur, en sortant du milieu biréfringent, les vibrations dont il se compose, au lieu de s'effectuer dans tous les sens, sont devenues parallèles, tout en s'effectuant toujours dans des plans perpendiculaires au rayon. Le polariseur a, pour ainsi dire, tamisé les vibrations du rayon de lumière naturelle : il a arrêté ou détruit les unes, pour ne laisser passer que les vibrations qui se trouvent dans le plan de la section principale. Pour parler plus juste : toute vibration parallèle à la section principale passe sans altération dans le cristal; toute vibration perpendiculaire est anéantie; enfin toute vibration oblique aux deux premières, se trouve décomposée en deux autres, l'une parallèle à la section principale du polariseur et qui passe, l'autre perpendiculaire, qui est arrêtée. De là, les propriétés, que nous avons décrites, de la *lumière polarisée*.

Les conséquences de la théorie des ondes ainsi modifiée sont très-nombreuses : jusqu'ici elles ont toutes été vérifiées par l'expérience; ou, si l'on veut, les phénomènes trouvés par l'observation s'expliquent comme ceux déduits de la théorie, avec une rigueur qui est la plus éclatante consécration des principes qui constituent le système des ondes.

Ajoutons maintenant quelques lignes sur les applicat qu'on a faites de la polarisation de la lumière à l'étude sciences physiques et naturelles.

Arago s'est servi de la polarisation par double réfra pour construire un appareil photométrique basé sur l'inte relative des deux images, intensité dont Malus a donné la Le même savant a indiqué un moyen de distinguer en me écueils cachés sous l'eau, et masqués par l'éclat de la lun réfléchie à la surface. En regardant à travers un prism Nicol, dont on a soin de placer verticalement la section p cipale, les rayons réfléchis sont éteints, et les rayons réfra seuls transmis à l'œil, révèlent la présence des rochers mergés.

La polarisation par réflexion permet de reconnaître lumière qui nous vient d'un corps a été réfléchie à sa face. C'est ainsi qu'on a vérifié la nature de la lumière astres, qui, comme la Lune et les planètes, nous renvoient simplement les rayons du Soleil, et qu'on a reconnu q lumière des noyaux cométaires est en partie emprunté Soleil, puisque divers observateurs y ont constaté des trace polarisation dans un plan passant par le Soleil et le noyau

La lumière de l'arc-en-ciel est polarisée dans un plan mal à l'arc et passant par l'œil de l'observateur. Nous ver en effet, que l'arc est formé de lumière réfléchie par les g telettes sphériques de la pluie. Arago s'est servi de la po sation par réflexion pour vérifier la nature de certaines pi précieuses : ayant fait tailler une petite facette à la surfac l'une d'elles, il détermina l'angle de polarisation et reco que c'était exactement celui du diamant. La polaris chromatique est d'un grand secours pour l'étude des crist elle permet de reconnaître si un cristal a un ou deux ax symétrie, quelle est la position de ces axes dans le cristal

Enfin, le quartz et un grand nombre de liquides, l'eau crée, les solutions d'acide tartrique, l'albumine jouissent d propriété que les physiciens ont caractérisée par le no

pouvoir rotatoire : une plaque de quartz, taillée perpendiculairement à l'axe, dévie d'un certain angle le plan de polarisation des rayons qui la *traversent ;* et cette déviation est différente pour les rayons des couleurs simples. Si la lumière polarisée qui a traversé le quartz est de la lumière blanche, les couleurs qui la composent seront éteintes en proportions différentes. De là, une certaine teinte provenant du mélange des rayons qui ne sont pas éteints. C'est le phénomène de la *polarisation rotatoire* découverte par Arago, en 1811, et dont Biot a étudié expérimentalement les lois.

Or, ces lois ont fourni à l'industrie une précieuse méthode, la *saccharimétrie*, à l'aide de laquelle on peut reconnaître la quantité de sucre pur que contient une dissolution sucrée. On voit donc que des phénomènes, qui semblaient d'abord n'intéresser que la théorie, peuvent conduire à des applications pratiques d'une grande importance.

CHAPITRE VII.

MESURE DE L'INTENSITÉ DES SOURCES LUMINEUSES

§ I. PRINCIPES DE PHOTOMÉTRIE.

Nous savons tous que le pouvoir éclairant d'une lun varie selon la distance à laquelle l'objet éclairé se trouv la source. Quand nous lisons le soir à la clarté d'une la d'une bougie, nous pouvons aussi remarquer que sans cha la distance où nous sommes du flambeau, il nous est poss en inclinant d'une certaine façon les pages de notre l d'obtenir des degrés d'éclairement très-variables; enfin, lieu d'une bougie nous en plaçons plusieurs à la même tance, ou encore si, au lieu d'une petite lampe, nous servons d'une lampe de plus grand modèle dont la m donne une flamme plus étendue, il n'est pas moins év pour nous que l'illumination sera augmentée dans une taine proportion.

D'autre part, le pouvoir éclairant varie avec la natur sources lumineuses, toutes choses égales d'ailleurs. La fla d'un bec de gaz nous paraît beaucoup plus éblouissante celle qui provient de la combustion d'une lampe alim avec de l'huile; la lumière de la Lune est infiniment moins que celle du Soleil, bien que les disques des deux astres à peu près la même grandeur apparente.

Il y a donc à distinguer, quand on veut apprécier l'inte des sources de lumière, certaines circonstances dont les sont inhérentes aux sources elles-mêmes, dont les autres

particulières aux objets éclairés par elles, telles que la distance, l'inclinaison, etc. Ce sont tous les problèmes relatifs aux appréciations de ce genre qui constituent la branche de l'optique appelée *photométrie*, de deux mots grecs qui signifient : le premier *lumière*, le second *mesure*.

Rien n'est plus délicat, plus difficile que la mesure des intensités lumineuses. Malgré tous les progrès réalisés dans la science de l'optique, on ne possède pas encore d'instruments qui donnent cette mesure avec une exactitude comparable à celles des autres éléments physiques. Le baromètre, le thermomètre inscrivent avec une sensibilité extrême, l'un la pression de l'atmosphère, l'autre la température; on sait apprécier la hauteur relative de deux sons avec une grande délicatesse. La photométrie est loin d'être aussi avancée, et la comparaison des intensités de deux lumières laisse toujours beaucoup à désirer. D'où vient l'infériorité que nous signalons? C'est que nous n'avons pas d'autre critérium ici que l'organe à l'aide duquel nous percevons la lumière. C'est la sensation de la vue qui est le seul juge, et en dépit de sa sensibilité excessive, l'œil est peu apte à prononcer sur les rapports numériques de deux ou plusieurs lumières qui se trouvent simultanément ou successivement en sa présence.

Alors même qu'il s'agit de juger de l'identité de deux sources, la difficulté est grande. Si les observations ne sont pas simultanées, la comparaison sera d'autant plus difficile qu'il s'écoulera entre elles un plus grand intervalle de temps. Il faut donc d'abord faire en sorte, et cela n'est pas toujours possible, que les deux lumières soient observées en même temps[1]. Le plus souvent l'éclat des sources éblouit l'œil, le

1. « Dans ce sens, dit J. Herschel dans son *Traité de la Lumière*, l'œil ne peut pas plus servir à donner la mesure de la lumière, que la main à donner le poids d'un corps pris au hasard. Cette incertitude s'accroît encore par la nature même de l'organe, qui est dans un état de fluctuation continuelle, dû à l'ouverture plus ou moins grande de la pupille, qui se contracte ou se dilate par l'excitation de la lumière même, et à la sensibilité variable des nerfs optiques. Que l'on compare seulement l'éclat éblouissant d'un éclair dans une nuit ob-

blesse, le rend incapable de juger avec tant soit peu de pr
sion, et voilà pourquoi les physiciens, au lieu de compe
entre elles les sources de lumières elles-mêmes, observent
surfaces de même nature, éclairées par ces sources dans
mêmes conditions d'inclinaison et de distance. Enfin, il
encore une cause d'incertitude dont il ne paraît pas aisé d
débarrasser, c'est la diversité des couleurs des lumières q
met en regard. « Entre deux lumières diversement color
dit J. Herschel, on ne peut établir aucun parallèle suscept
de précision; et l'incertitude de notre jugement est d'au
plus grande que cette différence de coloration est plus co
dérable. »

Malgré toutes ces difficultés, on est parvenu à établir,
par le raisonnement, soit par l'expérience, un certain non
de principes qui ont suggéré l'invention de divers appa
photométriques dont nous décrirons tout à l'heure les pri
paux. Aujourd'hui que l'éclairage public ou privé a pris
extension considérable, que l'on sent le besoin de favorise
navigation sur les côtes, en projetant au loin sur la mer
feux des phares, les photomètres sont devenus des instrum
d'une grande utilité pratique; mais les premiers proc
imaginés pour la comparaison des sources de lumière,
dus à des savants qui se préoccupaient uniquement du
scientifique du problème. Dès le dix-septième siècle, Au
et Huygens, dans le siècle suivant, André Celsius, Bougue
Wollaston, cherchèrent à déterminer l'éclat relatif des
mières des astres, par exemple l'intensité de la lum
du Soleil, comparée à celle de la Lune ou des plus brilla
étoiles.

scure avec la sensation produite en plein jour par la même cause : da
premier cas, l'œil est péniblement affecté, et l'agitation violente qu'épro
les nerfs optiques de la rétine se manifeste encore quelques instants ap
notre imagination par une succession rapide et alternative de lumière et
scurité. Pendant le jour, il ne se produit point d'effet semblable, et nou
vons les zigzags de la foudre avec la plus grande facilité, et sans être fr
de cet éclat prodigieux qui fait ressortir si vivement l'obscurité qui préc
qui suit l'éclair. »

Le premier principe qu'ils ont mis en évidence est le suivant : Quand la distance d'un point lumineux à l'objet qu'il éclaire varie, l'intensité qui émane de ce point varie *en raison inverse du carré de la distance.* Et en effet, le point lumineux rayonne de la lumière dans tous les sens avec une égale force; mais ces rayons divergent d'autant plus que la distance augmente davantage. S'ils sont arrêtés sur la surface d'une sphère d'un certain rayon, ils produiront sur un élément *m* de cette sphère une illumination d'une intensité déterminée : si, poursuivant leur chemin, ils sont arrêtés sur une sphère de rayon double, les mêmes rayons, qui se trouvaient ré-



Fig. 270. — Loi du carré des distances.

pandus sur la surface *m*, le seront sur la surface M de la nouvelle sphère. Or, la géométrie nous apprend que M est quatre fois aussi étendu que *m*, et comme c'est la même quantité de lumière qui se trouve répartie sur une surface quatre fois plus grande, on en conclut que son intensité doit être quatre fois moindre. A une distance triple, l'intensité serait neuf fois moins grande. En général, elle diminue donc de la même manière que le carré de la distance augmente.

Cette loi, du reste, n'est vraie qu'autant que l'on fait abstraction de l'absorption des rayons lumineux par les milieux dans lesquels ils se meuvent. Mais elle s'applique aussi au cas où la source de lumière n'est plus un simple point lumineux,

et offre une surface apparente appréciable, pourvu qu'elle s assez éloignée de l'objet éclairé, pour que ce dernier puis être considéré comme étant à la même distance de tous l points de la source.

Il résulte de ce premier principe de photométrie, que si l' présente à la lumière d'une bougie, par exemple, un morce de papier blanc, et qu'on l'en éloigne successivement à d distances 2, 3, 4 fois plus grandes, l'éclat deviendra à p de chose près 4, 9, 16 fois moins intense. Mais il faut po cela que le papier soit toujours placé perpendiculairement la direction des rayons lumineux. Si, sans changer la distan on incline le papier sur cette direction, il est évident q l'éclairement devra diminuer, puisque la même surface inte ceptera un nombre moindre de rayons. La quantité de lumiè reçue varie alors selon une loi qu'on nomme la *loi des cos nus*, parce qu'elle est proportionnelle aux cosinus des angl que fait la direction des rayons lumineux avec la perpendic laire à la surface éclairée.

Dans tout ce que nous venons de dire, il ne s'agit que pouvoir éclairant de la source de lumière, non de son éc intrinsèque. Si cet éclat intrinsèque ne varie pas, il est cl que le pouvoir éclairant sera d'autant plus considérable q la surface de la source sera elle-même plus grande, com aussi, au cas où l'éclat intrinsèque augmenterait, le pouv éclairant augmenterait dans la même proportion.

Une conséquence des principes qui précèdent, c'est qu'u source lumineuse conserve le même éclat intrinsèque appare quelle que soit la distance où elle se trouve de notre œil. A vérité, la quantité de lumière qui pénètre par l'ouverture notre pupille, diminue en raison inverse du carré de la d tance. Mais, comme elle émane d'une surface lumineuse d le diamètre apparent est de plus en plus petit et qui décroît raison directe du carré de cette même distance, il y a compen tion exacte, et l'éclat reste le même dans chacun des points la source. Voilà pourquoi la lumière des planètes, telles q

Vénus, Mars, Jupiter, nous semble toujours aussi vive, quand nous les voyons à une même hauteur au-dessus de l'horizon, si la pureté de l'atmosphère est d'ailleurs la même, bien que leurs distances à la Terre soient très-variables. Le Soleil est vu des différentes planètes, de Mercure à Neptune, sous la forme d'un disque dont la surface apparente varie de 1 à 7000 environ : la quantité de lumière que reçoit chacun de ces corps varie donc dans la même proportion; mais l'éclat intrinsèque du disque est le même dans Mercure que dans Neptune, à supposer que les espaces célestes n'absorbent point la lumière, et que, dans son passage à travers les atmosphères des deux planètes, celle-ci subisse le même degré d'extinction.

Tout le monde sait que si l'on regarde dans l'obscurité un boulet rouge, la forme sphérique n'est nullement sensible à l'œil : on croit voir un disque plat dont toutes les parties offrent la même intensité lumineuse. Si, au lieu d'un boulet sphérique, c'est une barre de fer ou d'argent polie et de forme prismatique, qu'on a chauffée au rouge incandescent, un phénomène analogue se présentera. Quelle que soit la position de cette barre, ses arêtes ne seront pas visibles, l'éclat sera le même partout, sur les faces qui se présentent perpendiculairement à l'œil comme sur celles qui sont plus ou moins inclinées : en un mot, l'observateur croira voir une lame entièrement plane. Fait-on tourner la barre sur elle-même, on ne reconnaîtra le mouvement qu'à la variation apparente de largeur du ruban lumineux. Que faut-il conclure de ces expériences? C'est que la quantité de lumière, émise par un corps solide incandescent dans une direction déterminée, dépend de l'inclinaison de sa surface sur la direction des rayons lumineux. En effet, si deux éléments égaux pris l'un sur le côté de la barre métallique qui fait face à l'œil de l'observateur, l'autre sur une face inclinée, émettaient dans cette direction la même quantité de lumière, il est de toute évidence que c'est la face inclinée qui paraîtrait avoir l'éclat le plus considérable, puisque le même nombre de rayons se trouveraient

répartis dans une aire dont la grandeur apparente se moindre. Le Soleil est une sphère lumineuse; mais l'aspect q présente est celui d'un disque plat, dont l'éclat intrinsèque n pas plus grand sur les bords qu'au centre[1], se qui confirme loi que nous venons d'énoncer, qui ce nomme aussi la *loi cosinus*, parce que la quantité de lumière, émise par des é ments égaux de la surface d'une source, varie comme *cosinus* des angles que font les rayons avec la normale à surface.

§ II. PROCÉDÉS PHOTOMÉTRIQUES.

Tels sont les principes sur lesquels on s'appuie pour éval soit le pouvoir éclairant, soit l'éclat intrinsèque des sources lumière. Il nous reste à décrire les appareils qui servent à mesure de ces intensités. Ce sont les *photomètres*.

Le photomètre de Rumford est représenté dans la figure 2 Il est basé sur ce fait, que si les ombres portées sur le mê écran par un corps opaque qu'éclairent deux lumières di rentes, ont la même intensité, les pouvoirs éclairants de deux lumières sont égaux, si elles sont à la même distance l'écran, ou sont en raison inverse des carrés de ces distan si elles en sont inégalement éloignées.

Supposons qu'on veuille comparer les pouvoirs éclair d'un bec de gaz et d'une bougie ordinaire. Devant un éc de papier blanc, on placera verticalement un bâton noir lindrique; et l'on disposera les deux lumières de façon les ombres du bâton viennent se projeter toutes deux su papier, à peu près au contact. On éloigne alors progressi ment celle des lumières qui donne l'ombre la plus inte jusqu'à ce que l'œil ne puisse plus distinguer de différe

1. Il est même aujourd'hui prouvé que ce sont les parties centrales du di solaire qui sont les plus lumineuses, contrairement à ce qui devrait être avait égalité dans l'émission de la lumière sur toute la surface. Les astron en ont conclu que l'astre est entouré d'une atmosphère absorbante.

entre les intensités des ombres. Pour juger mieux de l'égalité des ombres, on regarde l'écran par la face opposée à celle qu'éclaire directement la bougie et la flamme du bec de gaz. A ce moment, les parties lumineuses de l'écran reçoivent les rayons des deux lumières à la fois, tandis que chaque ombre n'est éclairée que par une d'elles : l'égalité de leurs teintes indique donc l'égalité des illuminations de l'écran par chaque source isolée. Les pouvoirs éclairants des deux lumières sont



Fig. 271. — Photomètre de Rumford.

donc, d'après le premier principe énoncé plus haut, en raison inverse des carrés de leurs distances à l'écran.

Le photomètre de Bouguer est fondé sur l'égalité d'éclat de deux portions d'une même surface éclairées séparément par chacune des sources. Il est représenté dans la figure 272.

Un écran opaque empêche la lumière de chaque source d'atteindre la partie de surface éclairée par l'autre. Quant à cette surface, c'était jadis un morceau de papier huilé, de verre dépoli. M. Léon Foucault employait de préférence une lame de porcelaine très-homogène et assez mince pour être translucide. Les deux portions éclairées isolément ne sont séparées que par une étroite ligne d'ombre projetée par l'écran, et l'œil

placé derrière juge aisément du moment où il y a égal d'éclat. Cette égalité obtenue, les intensités des lumières déduisent de leurs distances respectives à la lame de porc laine.

Nous nous bornerons à la description de ces deux genr de photomètres, qui peuvent servir l'un et l'autre à vérifier loi du carré des distances. Cette vérification est très-simpl il suffit de mettre d'une part une seule bougie : on trou alors qu'il en faut placer 4 à une distance double, 9 à u distance triple, etc., pour obtenir, soit l'égalité des omb



Fig. 272. — Photomètre de Bouguer.

sur l'écran, soit celle des parties éclairées de la lame de p celaine. Voici maintenant quelques-uns des résultats obte à l'aide de ces appareils.

Si l'on emploie deux lumières égales, deux bougies, et qu place l'une d'elles 8 fois plus loin de l'écran que l'autre, trouve que l'ombre portée par la première disparaît. A c distance, l'intensité de sa lumière est 64 fois moindre l'autre. Bouguer, à qui l'on doit cette expérience, en conc qu'une lumière d'une intensité quelconque n'est pas sensi à notre œil en présence d'une lumière 64 fois plus vive. C nous explique comment il se fait qu'en plein jour et par

ciel pur, les étoiles ne sont plus visibles, pourquoi de l'intérieur d'une chambre très-éclairée nous ne voyons rien la nuit au dehors par les fenêtres, pourquoi encore on distingue à peine, si l'on est au dehors par un beau soleil, ce qui se passe à l'intérieur d'un appartement.

Bouguer et Wollaston ont cherché l'un et l'autre à comparer la lumière du Soleil à celle de la pleine Lune, en prenant pour terme de comparaison la lumière d'une bougie. Tous deux ont trouvé que la lumière du Soleil équivaut aux lumières réunies d'environ 5600 chandelles placées à la distance de 30 centimètres. Quant à la lumière de la pleine Lune, Wollaston l'a trouvée égale à la 144e partie de celle d'une chandelle placée à la distance de $3^{m},65$. D'où il a conclu par un calcul facile que la lumière du Soleil vaut environ 800 000 fois celle de la pleine Lune. Bouguer ne trouvait que le nombre 300 000. En citant le nombre obtenu par Wollaston, nombre qui diffère tant de celui du physicien français, Arago ajoute : « Je ne saurais dire à quoi tient l'énormité de ce nombre comparé à la détermination de Bouguer, car la méthode employée était exacte et l'observateur d'une habileté incontestable. » Que conclure de là, sinon que le problème est à reprendre? Nous sommes surpris que les physiciens contemporains n'y aient pas encore songé.

CHAPITRE VIII.

L'ŒIL ET LA VISION.

Les phénomènes si nombreux, si variés, que nous veno de décrire, se rapportent tous à la propagation de la lumiè dans des milieux différents, et aux modifications qu'elle sub soit au point de vue de son intensité, soit au point de vue la couleur, quand on change les conditions de la route suiv par les rayons lumineux. Nous ne nous sommes pas préoccu jusqu'ici de la manière dont nos organes se trouvent affect par tous ces phénomènes, ni de la marche que la lumiè suit, quand elle cesse pour ainsi dire d'appartenir au mon extérieur pour devenir un phénomène interne.

Comment s'effectue ce passage, par quelle transformati un mouvement vibratoire, tel que celui des ondes de l'éthe arrive-t-il à produire chez l'homme et les autres animaux sensation de la vue? Comment des variations dans la vites ou dans l'amplitude des vibrations produisent-elles des vari tions correspondantes dans l'intensité de la lumière et da les couleurs des corps? Voilà une série de questions que science est loin d'avoir toutes résolues, et qui, d'ailleurs, so plutôt du ressort de la physiologie que de la physique.

Ce que l'on sait, ce que l'observation a permis d'étudi d'une façon positive, c'est la marche des rayons lumine dans l'œil, depuis l'instant où ils pénètrent dans l'organe, ju qu'au moment où, atteignant les nerfs, l'impression qu'ils produisent se transmet au cerveau et y détermine la sensati

de la vue. Pendant ce trajet, les rayons lumineux obéissent, comme nous allons le voir, aux lois connues de la propagation de la lumière dans des milieux de forme et de densité variables : il ne s'agit que de phénomènes de réfraction simple.

L'œil n'est autre chose qu'une chambre noire dont l'ouverture est munie en avant d'une fenêtre transparente, en arrière d'une lentille, et dont le fond est tapissé par une membrane qui sert d'écran où viennent se peindre, renversés, les objets extérieurs. Décrivons avec quelques détails cet admirable instrument.

L'œil est, comme on sait, logé dans une cavité du crâne qu'on nomme l'*orbite :* sa forme est celle d'un globe à peu près sphérique enveloppé de toutes parts d'une membrane dure, consistante, que sa ressemblance avec la corne a fait nommer *cornée*. La cornée se divise en deux segments d'inégale étendue; le plus petit, A, placé en avant de l'œil, a une courbure notablement plus prononcée que celle du segment postérieur; c'est comme un verre de montre bombé faisant corps avec le bulbe de l'œil. De plus, il est d'une parfaite transparence et incolore, tandis que l'autre segment H est opaque, et sa couleur est d'un blanc légèrement bleuâtre. On les distingue par les noms de *cornée transparente* et de *cornée opaque*, celle-ci constituant ce qu'on nomme vulgairement le blanc de l'œil.

Au travers de la cornée transparente, on aperçoit une membrane circulaire, dont la couleur varie selon les personnes ou les races, tantôt grise, tantôt bleu clair ou foncé, tantôt d'un brun jaunâtre. Cette membrane D, est l'*iris*, sorte de diaphragme percé à son centre d'une ouverture également circulaire, du moins chez l'homme, ouverture qu'on nomme la *pupille*. Derrière la pupille, qui est l'ouverture de la chambre noire, se trouve une lentille solide E : c'est le *cristallin*, dont la face antérieure offre une courbure moins prononcée que la surface interne. Le cristallin divise la cavité de l'œil en deux parties ou chambres de dimensions très-inégales, ainsi qu'on peut le voir dans la figure 273. La chambre antérieure B, com-

prise entre la cornée transparente et le cristallin, est plei
d'un liquide peu différent de l'eau pure et qui a, à peu près,
même pouvoir réfringent; on nomme ce liquide l'*hume*
aqueuse. Entre le cristallin et le fond de l'œil, se trouve
chambre postérieure toute remplie d'une substance transp
rente, incolore, ayant la consistance d'une gelée et un peu pl
réfringente que l'eau : c'est l'*humeur vitrée* L.

Un rayon de lumière qui pénètre dans l'œil traverse donc

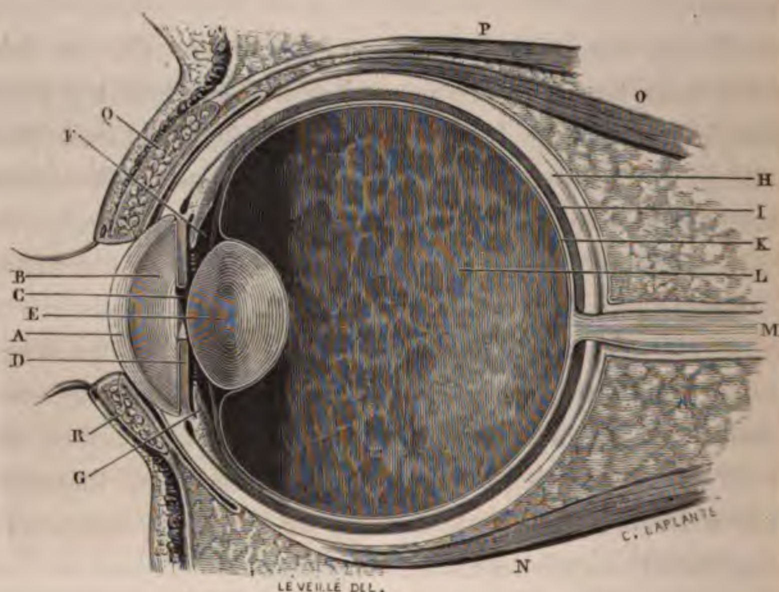


Fig. 273. — Coupe diamétrale antéro-postérieure de l'œil humain.

série de milieux réfringents que voici, avant d'arriver au fo
de l'organe : la cornée transparente, l'humeur aqueuse,
cristallin et l'humeur vitrée. Dans chacun de ces milieux,
subit une réfraction particulière, et l'ensemble de ses dévi
tions est tel, qu'il va former son foyer sur la membra
même qui tapisse la chambre postérieure de l'œil. C'est
moment de dire que toute la surface interne de la corn
opaque ou de la *sclérotique*, comme on dit en termes d'an
tomie, est recouverte d'une membrane mince, la *choroïde*

dont la face concave est tapissée d'un pigment noir propre à absorber la lumière.

Toutes les parties de l'œil que nous venons de décrire sont celles qui concourent à la formation des images des objets ; leurs fonctions sont pour ainsi dire passives. C'est à l'endroit même où se produisent ces images, qu'a lieu l'impression de la lumière sur la partie sensible de l'œil, et voici quelle est la disposition de cette partie qui joue le premier rôle dans le phénomène de la vision. Derrière le globe de l'œil, la choroïde et la cornée opaque sont percées d'un trou circulaire qui donne passage au faisceau des nerfs optiques. Ce faisceau M en arrivant à l'intérieur de l'œil, s'épanouit et s'étend sur toute la surface de la choroïde, formant une membrane directement en contact avec l'humeur vitrée : c'est la *rétine* K, qui est l'écran, mais un écran vivant et sensible, de la chambre noire de l'œil.

Il est facile de se rendre compte de la marche des rayons de lumière qui émanent d'un objet AB, et de la façon dont cet objet va faire son image sur la rétine. Le système lenticulaire, composé de la cornée transparente et du cristallin séparés par l'humeur aqueuse, a pour centre optique un point O, situé un peu en arrière du cristallin (fig. 274.) Si l'on mène les axes secondaires AO, BO, c'est sur leur prolongement, et au point où ils rencontrent la rétine, que convergent les faisceaux émanés des points A et B ; les points intermédiaires formeront leurs images entre les points *a* et *b*. L'image *ba* de l'objet sera donc renversée. Ce résultat est une des conséquences des lois de la réfraction et de la marche des rayons dans les lentilles ; mais on a pu le constater directement par l'observation. Ainsi, en prenant l'œil d'un animal qui vient de mourir, et en le débarrassant extérieurement des



Fig. 274. — Formation des images dans un œil normal.

couches de graisse dont le bulbe est enveloppé, on peut ami cir la cornée opaque, à sa partie postérieure, de façon à la re dre translucide. L'œil ainsi préparé et exposé à la lumiè du jour laisse voir par transparence l'image très-petite et tr nette des objets extérieurs. On peut aussi voir l'image re versée d'une bougie à travers la cornée des animaux albin cornée que l'absence de pigmentum colorant rend naturel ment translucide.

Nous avons dit que l'iris joue le rôle d'un diaphragme, ne laisse pénétrer dans l'œil que les cônes de lumière ay pour base l'ouverture de la pupille. Mais l'iris peut se co tracter ou se dilater spontanément, de manière à rétrécir au contraire à agrandir la pupille. Ce mouvement autom que se produit dans le premier sens, quand l'éclat de la l mière reçue par l'œil augmente ; il se fait en sens contra si cet éclat diminue. Même chose arrive, quand l'œil rega des objets situés à des distances différentes : la pupille s'élar pour les objets éloignés, se rétrécit pour les objets rappı chés de l'œil. Regardez votre œil même dans un miroir q vous tenez à la main à une certaine distance, et examinez dimensions de votre pupille; puis, rapprochez rapidement miroir sans cesser de fixer la pupille, vous verrez celle-ci rétrécir lentement.

L'œil étant assimilé à un système de lentilles, il peut p raître singulier qu'il serve à voir nettement tant d'obj situés à des distances si différentes. Il n'est pas douteux q pour que la vision soit distincte, l'objet doive faire son im nette sur la rétine même. Il faut donc, quand la distance chan que le foyer puisse changer aussi, de manière à coïnci toujours avec la surface de la membrane nerveuse. C'est fait qu'on exprime en disant que l'œil s'accommode aux d tances. Mais à l'aide de quel mécanisme l'œil conserve-t-il cette façon sa propriété de distinguer nettement les obje Pour les petites distances, le rétrécissement de la pupi pour les grandes, un changement dans la forme du crista

qui diminue son pouvoir convergent : tels sont les deux mouvements soumis à notre volonté, mais aussi se faisant sans que nous en ayons conscience, à l'aide desquels les physiciens expliquent l'adaptation dont il s'agit.

Il y a une limite inférieure à la distance des objets que nous cherchons à voir nettement : c'est la limite de la *vision distincte*, qui varie selon les individus et selon les âges, entre 15 à 20 centimètres. Mais pour un œil normalement constitué, il n'y a pas de limite supérieure.

La conformation de l'œil, peut être telle que la limite de la



Fig. 275. — Formation de l'image dans l'œil d'un presbyte.

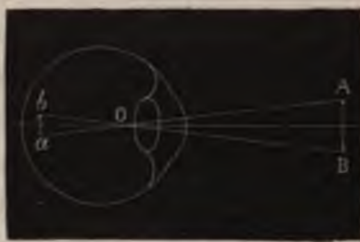


Fig. 276. — Formation de l'image dans l'œil d'un myope.

vision distincte soit beaucoup plus grande que celle dont nous venons de parler. Cette affection, qui se rencontre surtout chez les vieillards, les oblige à tenir un livre très-éloigné pour pouvoir lire sans confusion. Cela tient à ce que l'image va se former au delà de la rétine, de sorte que la convergence des rayons émanés d'un point lumineux n'ayant pas lieu sur cette membrane, il y a impression confuse. En éloignant l'objet, le foyer se rapproche et la vision devient distincte. Les personnes affectées de ce défaut de la vue sont les *presbytes :* on attribue le presbytisme soit à la diminution du cristallin, soit à une rigidité qui ne lui permet pas de s'adapter aux petites distances, soit enfin à un aplatissement du globe de l'œil, d'avant en arrière.

Les *myopes* ont un défaut opposé. La distance de la vision distincte est beaucoup plus courte pour eux que pour les vues normales; et à de grandes distances, la vision est toujours con-

fuse. Cela vient de ce que, pour des raisons opposées à cel
qui produisent le presbytisme, le foyer ou l'image d'un po
lumineux se forme en avant de la rétine. La trop grande c
vexité du cristallin, l'allongement du globe de l'œil sont
causes les plus ordinaires de la myopie. C'est un défaut
s'acquiert par l'habitude : les gens de lettres et de bure
les personnes que leurs obligations obligent à regarder
près de petits objets, sont fréquemment atteints de c
infirmité de la vue.

Nombre de physiciens se sont demandé pourquoi, les ima
des objets étant renversées sur la rétine, nous voyons ceux
dans leurs positions réelles, c'est-à-dire droits. Pour exp
quer cette singularité apparente, on a fait des hypothè
plus ou moins ingénieuses, mais qui, selon nous, n'
pas de sens, attendu que la question elle-même ne sig
fie rien. D'abord, l'image peinte sur la rétine n'est pas p
nous un objet que nous examinions, comme si nous possédi
encore un œil derrière la rétine. A la vérité, les objets ex
rieurs et nous-même, notre propre corps, sont vus par n
dans leurs positions relatives exactes : c'est tout ce qu'il fa
et, quand nous disons que nous voyons un objet, un arbre
exemple, droit et non renversé, cela signifie simplement
sa tête et ses pieds nous semblent, la première, s'élever d
l'air, l'autre toucher au sol, absolument dans le même s
que notre propre tête et nos pieds dans notre position norm
Si, par une disposition particulière de notre œil, analogu
celle de certaines lunettes, les images se faisaient droites
la rétine, il ne nous paraît pas douteux que notre percept
n'en serait nullement changée : pour qu'il en fût autreme
il faudrait qu'il y eût exception pour l'image de notre co
ce qui est hors de supposition.

L'impression faite par la lumière sur la rétine dure un c
tain temps : c'est ce qui fait que nous voyons sous la for
d'une ligne lumineuse un point brillant qui se meut avec

pidité; ainsi, une baguette dont l'extrémité est allumée, en tournant rapidement, prend à nos yeux l'apparence d'un cercle de feu. Des expériences, dues à M. Plateau, prouvent que la durée moyenne de la sensation est de 8 dixièmes de seconde; que la lumière doit persister un certain temps, pour que l'impression produite arrive à son maximum, et que la durée de ce maximum est en raison inverse de l'éclat lumineux; enfin que la durée de la sensation totale est d'autant plus longue que la lumière a une plus grande intensité.

LIVRE QUATRIÈME.

LA CHALEUR.

CHAPITRE I.

DILATATIONS DES CORPS PAR LA CHALEUR. — CHANGEMENTS D'ÉTAT.

§ I. PHÉNOMÈNES DE DILATATION ET DE CONTRACTION.

Tous les corps que nous connaissons, quel que soit leur état, solide, liquide ou gazeux, nous paraissent au toucher plus ou moins *chauds* ou *froids*. C'est là une impression qui dépend aussi bien, comme l'expérience de tous les jours nous le montre, de la disposition particulière de nos organes que de l'état du corps lui-même; et du reste, il peut arriver qu'il ne nous donne, au point de vue de la chaleur, aucune sensation, en un mot qu'il ne nous semble ni froid ni chaud.

Le même corps, quand nous le touchons à des instants différents, peut aussi produire en nous des sensations différentes et même opposées, soit parce qu'il s'est réellement dans l'intervalle échauffé ou refroidi, soit que nos organes aient subi eux-mêmes des modifications analogues, soit enfin que les deux causes dont il s'agit ici aient simultanément contribué à cette différence d'impressions. Tout le monde trouvera aisément

des exemples de l'influence de ces deux causes; et on com prendra combien il serait difficile d'apprécier les variatio de la chaleur dans les corps, si l'on n'avait pour base de cet appréciation que les sensations toutes personnelles produit au contact ou à distance. Supposons, par exemple, que no maintenions pendant quelque temps notre main droite da un vase d'eau froide, et notre main gauche dans de l'eau trè chaude, puis, que nous les plongions ensuite toutes deux la fois dans un troisième vase plein d'eau tiède : nous éprou verons simultanément deux sensations opposées, l'une chaleur, l'autre de froid, provenant l'une et l'autre, cepe dant, du même corps au même état.

Autre exemple de la difficulté que nous signalons: l'air ext rieur nous paraît froid, si nous sortons d'une chambre chaud au contraire, le même air nous semble chaud, quand no venons d'une cave fraîche. Qui de nous, entrant par un tem de gelée, dans un appartement bien chauffé, ne s'écrie q la chaleur y est étouffante ; et cependant, si dans la saison d chaleurs l'air se refroidit subitement, nous grelottons par même température qui nous semblait excessive en hiver. C' que nos organes, progressivement habitués au froid ou à chaleur, se font au contraire difficilement aux brusques tra sitions qui déterminent en eux des sensations beaucoup p vives. Il n'est donc pas possible, nous le répétons, de fa servir des impressions si variables à la détermination tant s peu rigoureuse de l'état thermique des corps.

De là, la nécessité de chercher, parmi les effets qui résult des variations de la chaleur dans les solides, les liquides et gaz, un phénomène assez général et assez constant pour p voir servir de point de comparaison dans les études de ce nature ; c'est-à-dire un phénomène dont on puisse constater mesurer les variations, sans qu'il y ait nécessité de faire int venir les impressions personnelles de l'observateur. Or, physiciens ont constaté un fait général, ou du moins ne so frant que deux ou trois exceptions, les unes apparentes,

autres réelles, à savoir : que tous les corps, quel que soit leur état physique, en s'échauffant augmentent de volume ou se dilatent, et en se refroidissant se contractent ou diminuent de volume. Décrivons d'abord quelques-unes des expériences propres à mettre en évidence le phénomène dont nous venons de parler, dans les solides, dans les liquides et dans les gaz.



Fig. 277. — Anneau de S'Gravesande. Dilatation des solides par la chaleur.

Une sphère métallique et un anneau de même substance ont des dimensions telles que, pour des conditions thermiques semblables, la sphère puisse passer à frottement doux par l'ouverture de l'anneau. Si l'on chauffe la boule isolément et qu'on la pose sur l'anneau, elle ne peut plus passer, ce qui prouve qu'elle s'est dilatée par l'échauffement : mais, si on la laisse se refroidir et revenir à son état primitif, elle passe de nouveau. Si, au contraire, on échauffe l'anneau, la sphère métallique passe avec facilité au travers de l'ouverture, d'où l'on conclut que celle-ci s'est agrandie et que l'anneau s'est dilaté. Enfin, si l'anneau et la sphère sont chauffés en même temps, tous deux augmentent de volume à la fois, et ils conservent les mêmes rapports de position qu'à l'origine. Ce petit appareil est connu sous le nom d'*anneau de S'Gravesande*, du nom du physicien anglais qui l'a imaginé. On lui donne quelquefois une autre forme (fig. 278), en substituant à la sphère un cône



Fig. 278. — Dilatation des solides.

métallique que l'anneau embrasse à des hauteurs différentes suivant que c'est l'anneau ou le cône qu'on a chauffé séparé-ment. Si l'accroissement de chaleur est le même pour le côn et l'anneau, c'est-à-dire si tous deux sont chauffés à la fois d la même manière, quoique isolément, l'anneau descend sur l cône à une hauteur invariable. Ce dernier fait nous fourni une indication importante sur la manière dont se dilatent le vases de forme quelconque, cylindriques, coniques, etc. Leu changement de volume s'effectue comme si le vase était rem-pli de la substance même qui forme son enveloppe : sa capacit



Fig. 279. — Dilatation linéaire d'une barre solide.

intérieure varie, comme le volume du noyau solide dont no parlons varierait lui-même, dans les mêmes conditions the miques.

La dilatation des corps par la chaleur se fait dans tous l sens, de sorte qu'une barre métallique ayant la forme d'u parallélépipède s'allonge selon ses trois dimensions, largeu longueur et épaisseur. De là, trois sortes de dilatation : la dil tation cubique, la dilatation superficielle et la dilatati linéaire. C'est cette dernière que l'on constate au moyen (l'appareil représenté dans la figure 279. Une barre métalliq est fixée invariablement à l'une de ses extrémités. Chauff dans toute sa longueur, elle se dilate librement par l'extrémi

qui vient s'appuyer contre la petite branche d'un levier coudé, de sorte que l'aiguille formant la grande branche du même levier parcourt, sur un cadran divisé, un arc d'autant plus grand que le rapport des longueurs des deux branches sera lui-même plus considérable. De très-petits allongements de la barre sont ainsi rendus sensibles.

La variation de la chaleur produit, dans les liquides, des variations de volume beaucoup plus prononcées que dans la plupart des corps solides. Voici un des moyens qu'on emploie pour mettre en évidence la dilatation des liquides.

On prend un ballon de verre auquel est soudé un tube ouvert, de faible diamètre ; on le remplit du liquide qu'on veut expérimenter, et l'on marque d'un trait *a* le point où il monte dans le tube (fig. 280). Plongeant alors le ballon dans de l'eau plus chaude que le liquide, on peut suivre aisément le mouvement de ce dernier dans le tube. D'abord, on voit le niveau descendre de *a* en *b*. Cela vient de ce que c'est l'enveloppe en verre, qui reçoit la première l'action de la chaleur : sa capacité s'accroît, avant que le volume du liquide intérieur ait pu compenser cette augmentation par sa dilatation propre. Mais, au bout de peu de temps, la contraction apparente cesse, et le liquide monte peu à peu jusqu'à un point *a'* où il demeure, quand l'équilibre est établi. Si l'appareil se refroidit, on verra le niveau descendre peu à peu, et reprendre à la fin sa hauteur primitive.

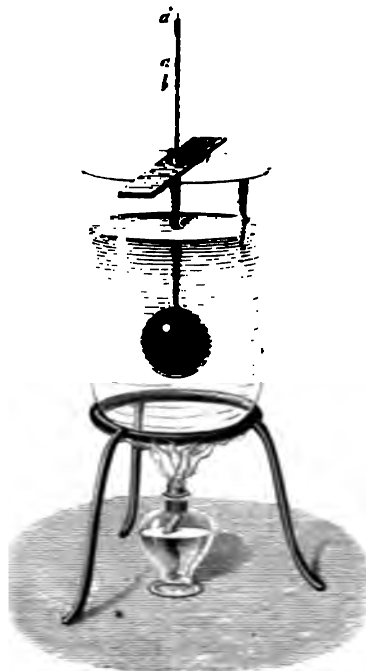


Fig. 280. — Dilatation des liquides par la chaleur.

Des liquides différents ne se dilatent pas également dans les mêmes circonstances. Mais, à une exception près, sur laquelle nous reviendrons bientôt, tous augmentent ou diminuent de volume, selon qu'ils s'échauffent ou se refroidissent.

Enfin les gaz sont encore plus dilatables que les liquides. Aussi, suffit-il d'approcher du feu une vessie hermétiquement



Fig. 281. — Dilatation des gaz par la chaleur.



Fig. 282. — Dilatation des gaz.

fermée et à demi pleine d'air, pour la voir peu à peu se gonfler. L'air qu'elle contient augmente donc de volume par la chaleur. On constate encore d'une autre façon la dilatabilité de l'air ou de tout autre gaz, sous l'influence d'une augmentation de chaleur. On prend un ballon de verre terminé par un long tube capillaire, ouvert à son extrémité (fig. 281). Dans le ballon se trouve le gaz dont on veut constater la dilatation, et qui est séparé de l'air extérieur par un index de mercure. Dès qu'on chauffe même légèrement le ballon, par le contact

des mains par exemple, le gaz intérieur s'échauffe aussi, se dilate et chasse l'index loin du réservoir. Quand le gaz se refroidit, son volume diminue, et l'index reprend lui-même sa position primitive. En employant un tube doublement recourbé (fig. 282), contenant du liquide au coude inférieur, on voit la dilatation se manifester par l'ascension, de *a* en *b*, du liquide dans l'une des branches, celle la plus éloignée du ballon, tandis que le niveau descend dans l'autre.

§ II. MESURES DES TEMPÉRATURES. THERMOMÈTRES

Voici donc un phénomène général bien constaté : les corps solides, les liquides et les gaz se dilatent quand leur température s'élève, et se contractent quand elle s'abaisse. A une quantité de matière donnée et invariable d'une certaine substance correspond, pour un état thermique particulier, un volume déterminé du corps. Il résulte de là, que les variations de la chaleur peuvent être mesurées par les variations de volume ou les dilatations. En effet, supposons qu'on prenne un corps solide, liquide ou gazeux, et qu'on fasse en sorte que la quantité de matière dont il est composé reste invariable, ou, si l'on veut, que son poids reste toujours le même. On conçoit la possibilité de mesurer, quand il s'échauffe ou se refroidit, soit son volume même, soit les variations de ce volume. Or, ce sont précisément ces variations qui serviront de mesure à l'échauffement ou au refroidissement du corps, de sorte que, toutes les fois qu'il aura le même volume déterminé, on pourra être assuré qu'il est dans le même état thermique, qu'il est à la même température.

La *température* d'un corps est donc, au point de vue de la chaleur, un état particulier, correspondant à un volume déterminé de ce corps. On dit que la température *s'élève*, quand le corps s'échauffe, et, par conséquent, sauf les exceptions dont nous parlerons plus loin, quand il se dilate ; sa tempé-

rature *s'abaisse*, au contraire, si ce corps se refroidit et ‹ lors diminue de volume.

On appelle *thermomètre* tout instrument qui indique mesure les variations de sa propre température et, avec p ou moins de précision, celle des milieux où il se troı plongé. Les appareils de ce genre sont nombreux, et n‹ verrons plus tard que la construction de certains d'en eux est basée sur d'autres principes que celui de la di tation et de la contraction des corps; mais les indicati‹ qu'ils donnent sont toutes rapportées à celles d'un therm mètre, qu'on est convenu de prendre pour étalon ou pour t de tous les autres. Nous voulons parler du *thermomètr‹ mercure*. C'est celui que nous allons d'abord décrire.

Le thermomètre à mercure est formé d'un tube de ve à diamètre intérieur très-petit ou capillai fermé par un bout, et terminé à l'autre b‹ par un réservoir sphérique ou cylindric (fig. 283). Le réservoir et une partie tube renferment du mercure parfaitem‹ pur, et le reste du tube est entièrement pu d'air et de tout autre gaz. Comme la ca cité intérieure du tube n'est qu'une très- tite fraction de la capacité du réservoir moindre variation de volume de ce dern se manifestera par un changement notable niveau du mercure dans le tube. Pour n surer ces variations, on convient de marq sur le tube du thermomètre deux points ‹ correspondent à deux températures inégal mais l'une et l'autre fixes et invariables, et diviser en un certain nombre de capaci égales l'intervalle mesurant l'accroissement total de volu que subit l'instrument en passant de la plus basse de températures à la plus élevée. L'expérience ayant mon que la glace fond toujours à la même température, et c

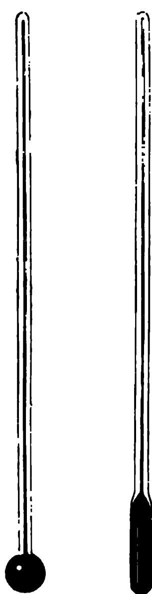


Fig. 283. — Réservoir et tube du thermomètre à mercure.

la température de la vapeur d'eau bouillante est pareillement constante, quand la pression barométrique est de 760 millimètres, ce sont ces deux températures fixes qu'on est convenu de prendre comme points de repère, pour la graduation du thermomètre à mercure. Voici comment on procède pour effectuer cette graduation.

On plonge le réservoir et une partie du tube dans un vase rempli de morceaux de glace pilée, et percé de trous à sa partie inférieure, afin que l'eau de fusion, qui pourrait prendre une température plus élevée que celle de la glace fondante, puisse s'écouler librement (fig. 284). Le niveau du mercure dans le tube étant devenu stationnaire, on marque à la même hauteur un trait sur la tige : ce point est le *zéro* de la graduation.



Fig. 284. — Détermination du zéro du thermomètre à mercure : température de la fusion de la glace.

On place ensuite le thermomètre dans la position qu'indique la fig. 285, c'est-à-dire dans une étuve où il se trouve complétement plongé dans la vapeur d'eau bouillante : l'étuve se compose d'une double enveloppe en tôle, où circule la vapeur avant de s'échapper dans l'air, de sorte que la température de la capacité interne n'est pas modifiée par le refroidissement extérieur. Là encore, on attend que le niveau du mercure, observé au dehors de l'étuve, soit devenu stationnaire, et l'on marque un second trait sur la tige. En ce point, on inscrit le nombre 100, si, comme nous l'avons dit, la pression barométrique est, à ce moment, de 760mm [1], ce qu'indique le

1. Si la pression barométrique n'est pas, au moment de l'expérience, de 760mm, le niveau du mercure n'indiquera plus le point fixe où l'on doit marquer 100°. On a reconnu que la différence était d'un degré centigrade (c'est la 100e partie de la dilatation totale entre le point de fusion de la glace et celui de l'ébullition de l'eau) pour une pression qui diffère de 27mm en plus ou moins de 760, de sorte qu'il faudra marquer 101° si la pression est 787mm, et 99°, si au contraire elle est seulement de 733mm. Entre ces limites, on fait une correction proportionnelle à l'excès ou au défaut de pression.

manomètre à branches recourbées, qu'on voit sortir à g
de l'appareil.

L'intérieur du tube étant parfaitement cylindrique, ce
on s'est assuré avant d'y souder le réservoir du thermomè

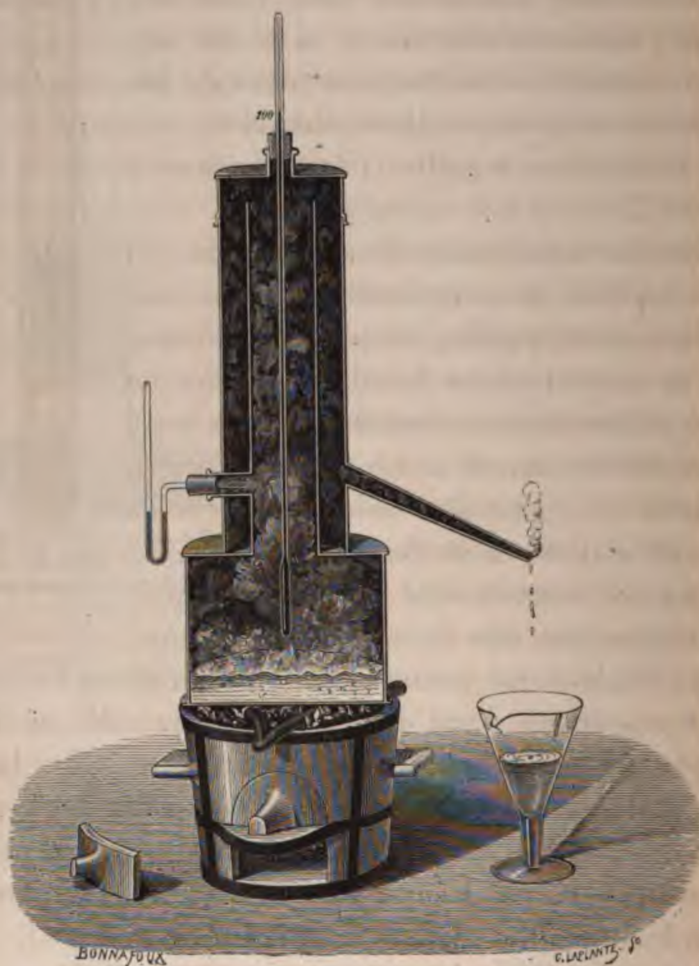


Fig. 285. — Détermination du point 100, température de l'ébullition de l'eau
sous la pression de 760mm.

est évident que, si l'on partage en 100 parties d'égale lon
l'intervalle qui sépare le zéro de la glace fondante, du
100 correspondant à la température de l'ébullition de
chacune de ces parties indiquera des capacités égale
quand le niveau du mercure les parcourra successive

des dilatations égales du liquide. Ces divisions, qu'on nomme des *degrés*, forment l'échelle des températures, échelle qu'on prolonge du reste au-dessus de 100° et au-dessous de 0°, pour la mesure des températures plus basses que celles de la glace fondante, ou plus élevées que celle de l'eau bouillante. Les divisions sont tantôt gravées sur le tube, tantôt sur un tube latéral soudé au premier, tantôt enfin marquées sur la planchette à laquelle on fixe l'instrument (fig. 286).



Fig. 286. — Thermomètres centigrades avec leurs échelles graduées.

L'échelle centésimale n'est pas la seule qui ait été adoptée pour graduer les thermomètres; mais c'est la plus généralement adoptée, et la seule dont on se serve aujourd'hui en France et dans un grand nombre d'autres pays. Elle est due au savant suédois André Celsius, qui vivait au dix-huitième siècle. L'échelle de Réaumur divisait en 80 degrés l'intervalle des deux mêmes points fixes, de la température de la glace fondante à celle de l'eau bouillante. Un calcul très-facile permet de transformer en *degrés centigrades* une température exprimée en *degrés Réaumur;* il suffit d'ajouter au premier nombre son *quart :* ainsi 28° R. valent 28° + 7° ou 35° C. D'une température centigrade, retranchez le cinquième, vous aurez la même température exprimée en degrés Réaumur : ainsi 35° C valent 35° — 7° ou 28° R : 32° C = 25°,6 R.

Dans l'échelle Fahrenheit, usitée en Allemagne, en Angleterre et aux États-Unis, l'un des points fixes est celui de l'ébullition de l'eau, comme dans les échelles précédentes; mais l'autre correspond à une température plus basse que celle de la glace fondante, celle d'un mélange de glace et de sel ammoniac. Le zéro est donc plus bas; au point d'ébullition de l'eau, Fahrenheit a marqué 212°. Comme on a reconnu que la température de la glace fondante correspondait au 32e degré

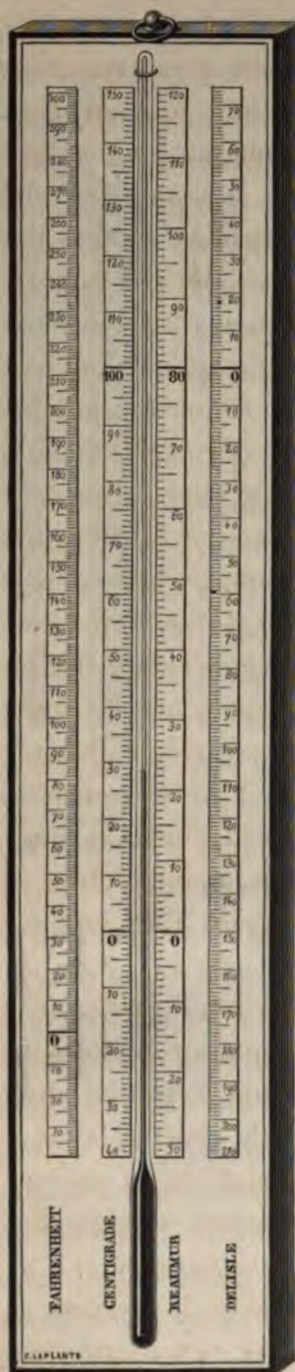


Fig. 287. — Échelles thermométriques.

de cette échelle, il en résulte que les cent degrés de l'échelle centigrade équivalent à 180 degrés Fahrenheit : de là, une transformation facile d'un nombre quelconque de degrés d'une de ces échelles dans l'autre. Veut-on savoir, par exemple, quel est en degrés centigrades l'équivalent de 120 degrés F.? On commence par retrancher 32, ce qui donne 88, dont on prend les $\frac{5}{9}$; et l'on a pour résultat 48°88C. Au contraire, étant donnée la température 45° C, pour la transformer en divisions de l'échelle Fahrenheit, on en prend les $\frac{9}{5}$, ce qui donne 81° F au-dessus de la glace fondante, laquelle est marquée 32° comme on l'a vu plus haut; 81°+32° ou 113° F est donc le résultat de la transformation.

On emploie encore, notamment en Russie, l'échelle de Delisle, qui marque 0° au point d'ébullition, et 150° à la glace fondante. Rien de plus simple que de transformer une température notée sur cette échelle en une quelconque des trois autres.

Il faut avoir soin, quand on énonce une température, suivant l'une ou l'autre de ces graduations, d'indiquer si elle est plus élevée ou plus basse que celle marquée par le zéro. C'est ce que font les physiciens en considérant les températures plus élevées que 0°

comme *positives*, et en les faisant précéder du signe +. Les températures inférieures à 0° sont alors négatives et on les affecte du signe —. Ces conventions une fois adoptées, il en résulte, pour les opérations à effectuer sur les nombres exprimant les températures, quand on les combine par voie d'addition ou de soustraction, des règles pareilles à celles des quantités algébriques positives et négatives. Mais il importe de donner à tous ces nombres leur signification véritable, et de se garder de leur attribuer une valeur absolue qu'ils n'ont pas. Ainsi, on ne peut dire qu'une température est double ou triple d'une autre, ou du moins, si l'on emploie ces expressions, il n'en faut rien conclure sur les quantités de chaleur qui leur correspondent. Cela signifie tout simplement que la dilatation du mercure, au-dessus du point fixe pris pour point de départ ou zéro, est dans ce cas double ou triple de la dilatation totale correspondant à la seconde élévation de température. En un mot, il faut se rappeler que l'unité de température, le degré centigrade dans l'échelle centésimale, par exemple, représente une dilatation du mercure contenu dans le réservoir d'un thermomètre, égale à la centième partie de la dilatation totale que subirait le même liquide, en passant de la température de la glace fondante à celle de l'ébullition de l'eau. Rien de plus.

Le thermomètre que nous venons de décrire est fondé sur la dilatation du mercure, c'est-à-dire d'un liquide contenu dans une enveloppe de verre. Mais quand, par une variation quelconque de température, le volume du liquide change, la capacité de l'enveloppe change aussi : si ces dilatations ou ces contractions du mercure et du verre étaient égales, comme elles se font dans le même sens, le niveau ne varierait pas, et il ne donnerait dès lors aucune indication. En réalité, le mercure se dilate sept ou huit fois autant que le verre, et c'est ce qui rend le thermomètre possible. Mais on voit par là, que ce n'est point uniquement la dilatation du mercure qui fait varier le niveau : c'est la différence entre la dilatation du liquide et celle de

l'enveloppe, en un mot, c'est la dilatation *apparente* du m
cure, non pas sa dilatation absolue. Mais il n'en est pas moi
évident que des thermomètres différents, construits et grad
comme nous venons de le dire, seront toujours comparab
entre eux, quelles que soient d'ailleurs les dimensions
tubes et des réservoirs, et la quantité de mercure employée po
chacun d'eux. Seulement, comme les diverses qualités de ve
ne sont pas également dilatables, surtout vers les températu
élevées, pour qu'il y ait accord entre les indications des i
truments placés dans les mêmes circonstances, il faut que le
réservoirs soient formés de verres ayant la même compositi

La sensibilité d'un thermomètre à mercure, c'est-à-dire
rapidité avec laquelle il se met en équilibre de températ
avec le milieu ambiant, est d'autant plus grande que la ma
de mercure du réservoir est plus faible, et que la surface
l'enveloppe est plus considérable. Pour qu'il remplisse le mie
possible cette seconde condition, on donne au réservoir
forme d'un cylindre, préférable à celle d'une boule sphériq
ou bien la forme d'un tube enroulé en spirale. Cette sorte
sensibilité est surtout désirable, quand on veut apprécier
variations de température qui se succèdent promptement. Il
un autre genre de sensibilité non moins utile que le premie
c'est celle qui permet d'apprécier aisément de très-faibles
riations du niveau, correspondant à de très-petites variati
dans la température, en un mot d'évaluer de très-petites fr
tions de degré. Cette qualité s'obtient en donnant une gra
capacité au réservoir et un faible diamètre au tube, de fa
que, pour une dilatation d'un degré, le niveau varie consi
rablement. M. Walferdin a construit des thermomètres auxqu
il donne le nom de *métastatiques*, qui permettent d'appréc
les centièmes de degré; chaque fois qu'on les emploie,
faut, en ajoutant ou enlevant du mercure, régler leur cou
pour la température dont on veut apprécier les variations.

Le thermomètre à mercure ne peut pas servir pour les te
pératures supérieures à 360° au-dessus de zéro; à ce point

liquide entrerait en ébullition et briserait le tube. De même, au-dessous de — 35° ou de — 36°, le mercure approche de la température où il se congèle et se solidifie ; il en résulte des contractions irrégulières qui rendraient les indications inexactes. Au delà de l'une et de l'autre de ces limites, il faut donc employer des thermomètres d'une autre nature, que nous allons rapidement décrire.

Commençons par le thermomètre à alcool, employé pour mesurer les températures très-basses. Cet instrument ne diffère point du thermomètre à mercure par la forme ; mais on est obligé de le graduer par comparaison avec un thermomètre étalon de la première espèce, c'est-à-dire de plonger simultanément les deux tubes dans des bains dont on fait varier la température. On note les points où s'arrête, pour chacune d'elles, le niveau de l'alcool ; on y marque les indications du thermomètre à mercure, et l'on divise les intervalles en autant de parties égales qu'il y a de degrés de l'une à l'autre. Mais, même en prenant ces précautions, il est rare que les thermomètres à alcool s'accordent entre eux ou avec le thermomètre étalon, ce qui tient à l'irrégularité de la dilatation de ce liquide aux diverses températures. Pour les températures inférieures à celles de la glace fondante, il serait préférable d'employer des thermomètres remplis avec l'éther ordinaire, qui se dilate avec une plus grande régularité que l'alcool.

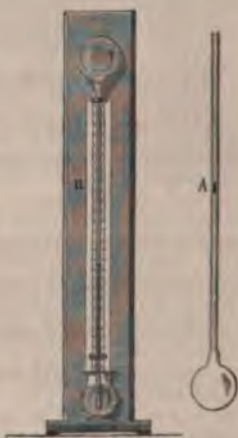


Fig. 288. — Thermomètres à air, de Galilée et de Cornélius Drebbel.

On construit aussi des thermomètres à gaz, fondés, par exemple, sur la dilatation de l'air. La figure 288 représente deux de ces appareils, les premiers qui aient été inventés pour mesurer les variations de la température. L'un a été imaginé par Galilée : il consiste en un tube à réservoir renfermant une petite colonne liquide ou index A, qui sépare l'air du réservoir

de l'air extérieur. Quand la température augmente, l'air contenu dans la boule du thermomètre s'échauffe, se dilate et chasse l'index vers l'extrémité ouverte du tube. L'autre appareil est aussi formé d'un tube à réservoir d'air semblable au premier; mais son extrémité ouverte plonge dans un liquide contenu dans un vase ouvert; par le refroidissement, l'air diminue de volume, et par suite son élasticité devient moindre, de sorte que le liquide, qui subit toujours la pression atmosphérique extérieure, s'élève plus ou moins haut dans le tube. C'est à un Hollandais, Cornélius Drebbel, qu'est due l'invention de ce second appareil, très-répandu au siècle dernier. Ces deux thermomètres se graduent maintenant par comparaison avec un thermomètre à mercure : on marque les points où s'arrête le liquide à deux températures différentes, et on partage l'intervalle en autant de parties égales qu'il comprend de degrés. Mais l'un et l'autre sont affectés aussi par les changements de la pression atmosphérique, et dès lors ne sont pas susceptibles d'une grande précision. Leur qualité consiste surtout dans la rapidité de leurs indications.

Leslie et Rumford ont imaginé deux thermomètres fondés sur la dilatation de l'air, mais n'offrant pas les inconvénients des précédents, c'est-à-dire n'étant pas influencés par la pression atmosphérique. Tous deux sont formés d'un tube doublement recourbé, terminé à chaque extrémité par une boule ou réservoir. Dans le thermomètre de Leslie (fig. 289) le tube renferme une colonne liquide d'acide sulfurique coloré en rouge, dont les niveaux sont les mêmes en chaque branche, quand la température des deux boules est égale. On marque 0 à ce niveau commun. Si l'on chauffe alors un seul des deux réservoirs, la dilatation de l'air qu'il contient refoule le liquide; le niveau de la branche correspondante s'abaisse en b, tandis qu'il s'élève dans l'autre branche en a; et la hauteur au-dessus du zéro marque la différence de température des réservoirs, si l'instrument a été gradué par comparaison avec un thermomètre à mercure.

Le thermomètre à air de Rumford diffère du précédent, en ce que la colonne liquide est remplacée par un index qui occupe le milieu de la branche horizontale du tube, quand il y a égalité de température entre les deux réservoirs. Si l'un de ceux ci s'échauffe plus que l'autre, la dilatation de l'air fera marcher l'index dans la partie horizontale du tube, du côté de la boule la plus froide, et l'on mesurera la différence des températures

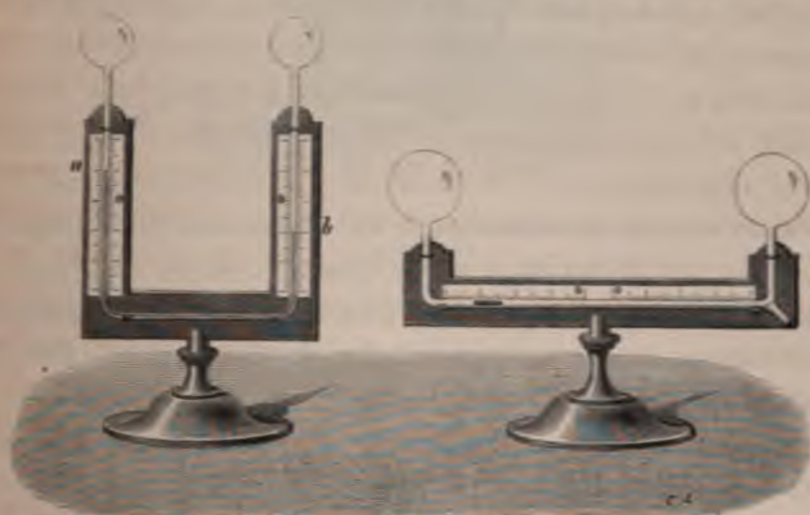


Fig. 289. — Thermomètres différentiels de Leslie et de Rumford.

par le nombre des divisions que cet index aura parcourues à partir du zéro.

Ces deux instruments marquent ainsi des différences de température : c'est pourquoi on les appelle *thermomètres différentiels*. Mais ils peuvent donner aussi les températures absolues, si la graduation a été faite dans ce but.

La dilatation des corps solides peut aussi servir à mesurer la température. Les appareils que nous avons décrits plus haut sont fondés sur l'inégalité de dilatation des liquides ou des gaz et des enveloppes qui les renferment : cette inégalité, déjà sensible pour les liquides, devient considérable dans les gaz. C'est aussi sur l'inégalité de dilatation des différents corps solides

qu'est basée la construction des thermomètres métalliques r présentés dans les figures 291 et 292. Deux lames métallique l'une de cuivre, l'autre de zinc par exemple, soudées l'une l'autre dans toute leur longueur de manière à former une bar



Fig. 290. — Inégalité de la dilatation de deux métaux différents, pour une même élévation de température.

droite, s'allongent inégalement si l'on élève leur températur la barre se courbe alors comme le montre la figure 290, zinc, le plus dilatable des deux métaux, formant le côté convex et le cuivre le côté concave. En revenant à sa température pr



Fig. 291. — Thermomètre métallique à cadran.

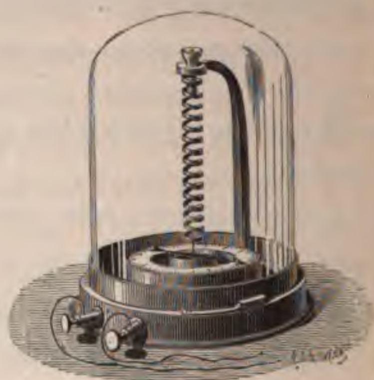


Fig. 292. — Thermomètre métallique de Bréguet.

mitive, la barre reprend sa forme rectiligne, pour se courber sens inverse, si on la soumet ensuite à un refroidissement.

Le thermomètre métallique à cadran (fig. 291) se compo d'une lame courbe de cuivre et d'acier soudés. L'une des ext

mités est fixe, et l'autre s'appuie sur le petit bras d'un levier, dont le grand bras, en forme de secteur denté, s'engrène au pignon de l'aiguille. Les variations de la température augmentent ou diminuent la courbure de la lame, et dès lors font mouvoir, tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre, le levier et par suite l'aiguille. Le cadran a été divisé en degrés par comparaison avec un thermomètre à mercure.

Dans le thermomètre métallique de Bréguet (fig. 292) la lame est formé de trois rubans d'argent, d'or et de platine, dont le système est contourné en hélice, l'argent, le plus dilatable des trois métaux, formant la surface intérieure des spires. L'hélice est suspendue verticalement, et son extrémité inférieure supporte une aiguille horizontale qui parcourt les divisions d'un cadran. La température s'élève-t-elle, la courbure des spires diminue sous l'influence de la plus grande dilatation de l'argent, et l'aiguille marche dans un sens : le contraire arrive, si la température s'abaisse. Comme la masse de l'hélice est extrêmement faible, elle se met très-rapidement en équilibre de température avec l'air qui l'environne : le thermomètre de Bréguet est donc très-sensible, et très-propre à accuser les brusques variations de la température.

Nous ne ferons que mentionner les *pyromètres*, appareils ayant pour objet de mesurer les températures très-élevées comme celles des hauts fourneaux, des feux de forges, etc., et fondés, les uns sur la dilatation des solides, les autres sur la contraction de l'argile. Du reste, les tentatives qu'on a faites pour rendre comparables les indications des pyromètres avec celles du thermomètre à mercure, n'ont pas donné des résultats d'une suffisante exactitude. Quand on veut obtenir une précision plus grande, on se sert pour mesurer les hautes températures de pyromètres à air, dont on trouvera la description dans les traités de physique.

Tous les thermomètres que nous venons de décrire accusent les variations de leur propre température par les différentes

dilatations et contractions de leur propre substance. Mais le bu qu'on se propose, en les construisant, est de mesurer la température des milieux ou des corps solides, liquides ou gazeux ce qui exige dans ces divers cas des précautions particulières

S'il s'agit de la température de l'air ou du gaz, ou encor d'un liquide, on plonge le thermomètre dans le milieu, et s'i est d'une grande sensibilité, si sa masse est très-petite en comparaison de celle du milieu, la température indiquée par l thermomètre, quand le niveau du mercure ou l'index est en équilibre, peut être prise sans erreur sensible pour celle du milieu même. S'il s'agit d'un corps solide, on creuse une cavit assez grande pour loger le réservoir de l'instrument, ou mieux on remplit cette cavité de mercure ; au bout de quelqu temps, la température de ce liquide se met en équilibre ave celle du corps, et c'est alors qu'on y plonge le thermomètre Il faut toujours que la masse de celui-ci soit très-petite, comparée à celle du corps ; en effet, comme il y a échange d chaleur entre eux, l'indication ne se rapporte plus à la température primitive du corps, mais à celle qui s'établit à l suite de cet échange, et dans l'hypothèse où la masse d l'instrument serait trop grande, la différence pourrait êtr considérable. Du reste, il est clair que cette cause d'erreur n peut jamais être entièrement évitée : on peut seulement e atténuer assez les effets, pour que le résultat ne soit pa altéré d'une manière sensible.

§ II. MESURE DE LA DILATATION DES SOLIDES.

Un corps se dilate, quand sa température augmente : voi le fait général que nous avons constaté, et qui sert à mesur les changements de la température. Mais de combien son volume augmente-t-il, de quelle fraction du volume primit s'est-il accru pour une élévation d'*un degré* du thermomèt centigrade? Cette fraction varie-t-elle d'un corps à un autr

et, pour le même corps, reste-t-elle la même à toute température? Telles sont les questions que se sont naturellement posées les physiciens, après avoir reconnu par l'observation les effets des variations de la chaleur. Avant de donner une idée des résultats auxquels ils sont parvenus, montrons par quelques exemples l'utilité pratique de la connaissance précise de ces effets, et la nécessité où l'on est souvent de les corriger ou de les prévoir.

Si l'on soumet un corps fragile et mauvais conducteur de la chaleur à un brusque changement de température, l'effet produit sera la rupture du corps. Ainsi un morceau de verre froid sur lequel on pose une barre de fer rouge se fend; il en est de même d'un morceau de verre très-chaud au contact duquel on met subitement une barre de fer froide. Dans le premier cas, une dilatation brusque se fait dans les parties du verre touchées par le fer rouge, et les parties voisines, qui n'ont pas eu le temps de s'échauffer encore, s'écartent violemment des premières, d'où la rupture. Dans le second cas, ce sont au contraire les parties touchées qui se contractent, avant que les parties voisines aient eu le temps de se refroidir, et la rupture est encore la conséquence de ce brusque mouvement moléculaire. Tout le monde sait qu'il ne faut pas verser de l'eau bouillante dans un vase froid, sous peine de le voir se briser par l'effet de la dilatation brusque de la portion des parois que touche le liquide. Le même accident arriverait si l'on posait le vase vide sur des charbons ardents : on évite ce résultat en remplissant le vase du liquide qu'on veut chauffer, avant de le mettre sur le feu.

La dilatation, pendant les saisons chaudes, des métaux qu'on emploie dans les constructions, leur contraction par les froids de l'hiver donnent lieu à des effets d'autant plus sensibles, que ces métaux sont unis à des matériaux dont la dilatabilité diffère plus de la leur. En voici un exemple curieux cité par Tyndall dans son ouvrage sur la *Chaleur*, et dont l'observation et l'explication sont dues au chanoine Moselly :

« Le toit du chœur de la cathédrale de Bristol est en feuille: de plomb; sa longueur est de 20 mètres; et sa hauteur d(7 mètres. Il avait été posé en 1851, et deux ans après, c'est-à-dire en 1853, il était descendu de près de 1m. 50. Le ploml avait commencé à descendre presque immédiatement aprè: la pose. On avait essayé, mais en vain, de l'arrêter dans s(marche par des clous plantés dans les chevrons; la force qu l'entraînait était telle, que les clous furent violemment arra-chés. La pente du toit n'est pas très-forte; ce n'est donc pa le poids des plombs qui aurait pu les faire glisser. Voic simplement la cause qui les a fait descendre : le plomb es exposé aux variations de température du jour et de la nuit Pendant le jour, la chaleur le dilate, et, s'il reposait sur un(surface horizontale, la dilatation s'effectuerait également dan tous les sens; sur une surface inclinée, elle est plus grande e1 descendant qu'en montant. Pendant la nuit, au contraire, l plomb se contracte par le refroidissement, mais le retrait d haut en bas du bord supérieur est plus grand que le retrai de bas en haut du bord inférieur. Ses mouvements étaient don exactement ceux d'un ver de terre : il poussait en avant so: bord inférieur pendant le jour; il tirait à lui son bord supé-rieur pendant la nuit; les variations de température du jour o: de la nuit agissaient dans le même sens. C'est ainsi qu'e rampant lentement, il s'était avancé en deux années d 1m. 50. »

On voit, par cet exemple, combien il importe de teni compte des changements de volume des solides employé dans les constructions ou dans l'industrie. Les rails des voi(ferrées s'allongent en été, se raccourcissent en hiver; faut donc, quand on les pose, laisser un jeu qui permette l'allongement de se produire librement, sans quoi la chale1 ferait sauter les chevilles dans les coussinets ou déformera la voie. Le déraillement qui a occasionné la catastrophe d Fampoux, sur le chemin de fer du Nord, a eu pour caus(paraît-il, une déformation de ce genre, provenant de ce q1

les bouts des rails n'avaient pas entre eux un intervalle suffisant.

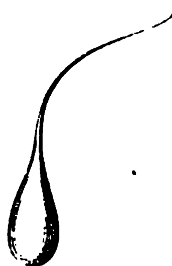
Les pierres scellées par des crampons de fer sont souvent brisées, tantôt par la dilatation, tantôt par la contraction du métal, l'une et l'autre plus considérables que celles de la pierre. La force avec laquelle les molécules des corps sont tantôt écartées, tantôt rapprochées les unes des autres par le changement de température est énorme. Une barre de fer longue d'un mètre se dilate de $1^{mm}.17$ dans le sens de sa longueur, quand on élève sa température de $0°$ à $100°$: elle se contracterait de la même quantité, en passant de $100°$ à $0°$. Or on calcule que, pour vaincre ce mouvement moléculaire, il faudrait exercer dans un sens ou dans l'autre un effort équivalant à la pression de 2450 kilogrammes, si la barre de fer a un centimètre carré de section, de 245 000 kil. si la section est d'un décimètre carré. On a utilisé cette force pour rapprocher les murs latéraux d'une galerie du Conservatoire des Arts et Métiers, que la poussée de la voûte avait écartés de la verticale. Des barres de fer furent placées de manière à traverser les deux murs à leur partie supérieure; elles étaient extérieurement terminées en forme de vis munies d'écrous. On les chauffa vivement dans toute leur longueur, ce qui produisit un certain allongement, et on serra les écrous contre d'épaisses pièces de bois appliquées sur la face extérieure des murs de la voûte, pendant que les barres étaient encore chauffées. Le refroidissement contracta les barres, et la force de contraction rapprocha peu à peu les murs. En répétant plusieurs



Fig. 293.—Salle du Conservatoire des Arts et Métiers. Murs redressés par la force de contraction.

fois la même opération, on finit par les ramener à une position verticale. Les charrons utilisent la force de contraction du fer qui se refroidit, pour garnir de jantes les roues des voitures. Le cercle de fer est forgé, de manière à embrasser le contour du bois quand il est chauffé à une assez haute température : en se refroidissant, il serre fortement le contour de la roue.

On appelle *larmes bataviques*, ou *gouttes de Rupert*, des gouttes de verre fondu qui ont été subitement solidifiées dans l'eau froide. En brisant le filament de verre qui les termine, toute la masse se trouve instantanément réduite en poussière, avec une telle force que, si l'on a préalablement plongé la larme batavique dans un flacon plein d'eau, le choc transmis par l'eau suffit pour briser le flacon. On obtient un effet analogue avec des flacons de verre très-épais, refroidis subitement aussitôt après avoir été soufflés. Un grain de sable projeté dans le vase suffit pour faire voler le fond en éclats (Tyndall). La raison de ce phénomène est la même dans ce dernier exemple que dans les larmes bataviques. C'est l'extérieur des gouttes de verre qui s'est refroidi le premier emprisonnant la masse intérieure non encore solidifiée. En se refroidissant à son tour, celle-ci se contracte, et l'effort de la contraction s'exerçant partout également sur l'enveloppe extérieure, celle-ci reste en équilibre. Mais toutes les molécules sont dans un état de tension violente, et la moindre rupture détruisant subitement l'équilibre en un point, le détruit en même temps dans toute la masse.


Fig. 294. — Larme batavique.

Voyons maintenant comme on détermine ce qu'on nomme le *coefficient de dilatation* d'un corps, solide, liquide ou gazeux. Voici ce qu'on entend par là. L'unité de volume du corps étant donnée, supposons qu'on en élève la température d'un degré centigrade : il y aura dilatation ou accroissement de vo-

lume. C'est cet accroissement, exprimé en nombres au moyen de la même unité, qui constitue le coefficient de dilatation de la substance pour la température considérée. On peut dire, d'une manière plus générale, que c'est la fraction du volume primitif dont s'accroît le volume d'un corps quelconque, quand sa température s'élève d'un degré. Ainsi un litre ou 1 décimètre cube de mercure chauffé de 0° à 1° devient un litre, plus 179 millionièmes de litre, ou $1^{dc}.000\,179$. La fraction 0.000 179 est le coefficient de dilatation du mercure, pour la température zéro. Les nombres dont il s'agit ici varient avec la nature et l'état physique des substances. De plus, le coefficient de dilatation d'un même corps varie en général aux différents degrés de l'échelle thermométrique, alors même que son état physique ne change pas.

Pour les liquides et les gaz, on ne considère que la dilatation en volume ou cubique; mais on peut, dans les solides, s'occuper seulement de l'accroissement de l'une des dimensions, c'est-à-dire de la *dilatation linéaire*, ou suivant deux dimensions, c'est-à-dire de la *dilatation superficielle*. Comme un corps solide de forme quelconque se dilate en général également dans tous les sens, de manière à rester semblable à lui-même à toutes les températures, on peut donc déduire l'accroissement de son volume de celui d'une seule de ses dimensions; d'ailleurs on démontre que le coefficient de dilatation cubique est sensiblement le triple du coefficient de dilatation linéaire. Voilà pourquoi, quand il s'agit de corps solides, c'est ce dernier coefficient qu'on cherche seul à déterminer.

Disons en quoi consiste essentiellement la méthode imaginée par Lavoisier et Laplace, pour mesurer la dilatation linéaire d'une barre solide. La barre AB est maintenue fixe en A, de sorte qu'elle ne peut se dilater qu'à l'extrémité B. En se dilatant de la quantité BB', elle pousse une tige OB qui peut tourner autour du point O, dans la position OB'. Une lunette LL qui était d'abord horizontale tourne elle-même avec

la tige en L'L', de sorte qu'au lieu de viser le point C de l
mire verticale CC', elle vise alors le point C'. Par ce moyen, o

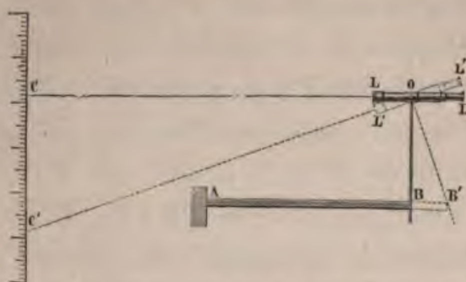


Fig. 295. — Mesure de la dilatation linéaire d'un solide. Principe de la méthode de Lavoisier et Laplace.

substitue donc à la me sure difficile de la trè petite quantité BB' cell d'une longueur CC', q vaut autant de fois l première que la distan OC de la mire contie de fois la hauteur de l tige OB.

La figure 296 mont la disposition de l'appareil qui a servi à réaliser la métho précédente. On voit la barre métallique S dont on veut m surer la dilatation, plongée dans une cuve remplie d'ea au-dessous de laquelle est établi le foyer qui doit e élever la température. D'une part, elle s'appuie cont



Fig. 296. — Appareil de Laplace et Lavoisier pour la mesure de la dilatation linéaire.

une tige de verre fixe, B', invariablement liée aux pilier d'autre part, elle bute contre la règle de verre mobile qui communique son mouvement à la lunette. L'eau de cuve étant d'abord à 0°, les observateurs notent la division la mire à laquelle correspond le fil micrométrique horizont lement tendu au foyer de la lunette. Puis, après avoir ren

placé l'eau glacée par de l'eau qu'on porte à une température de 100°, celle de l'ébullition, ils observent de nouveau la division de la mire. Par une proportion simple, ils en concluent le rapport de l'allongement de la barre à sa longueur primitive, c'est-à-dire sa dilatation pour 100 degrés de température.

En opérant de la même manière pour des barres solides de diverses natures, entre des limites de température différentes, Laplace et Lavoisier ont trouvé, pour les coefficients de dilatation des solides, des nombres qui varient d'un corps à l'autre, mais qui sont sensiblement constants pour les divers degrés de l'échelle thermométrique, entre la température 0° et la température 100°. Voici quelques nombres, tels qu'ils ont été déterminés par divers observateurs, soit par la méthode que nous venons de décrire, soit par des procédés différents :

Fer........	0,0000118	Aluminium.....	0,0000222
Cuivre......	0,0000172	Bronze.........	0,0000185
Étain......	0,0000217	Charbon de bois.	0,0000110
Plomb.....	0,0000288	Granit.........	0,0000090
Zinc.......	0,0000341	Marbre blanc...	0,0000107
Argent.....	0,0000190	Pierre à bâtir...	0,0000090
Or.........	0,0000155	Verre en tubes..	0,0000083
Platine.....	0,0000088	Glace..........	0,0000528
Acier......	0,0000118		

Les coefficients de dilatation qui précèdent ne s'appliquent qu'aux échantillons qui ont servi à les déterminer; on trouve pour les mêmes substances, suivant les observateurs, des nombres notablement différents, ce qui tient à l'état moléculaire particulier où se trouvaient les substances employées par chacun d'eux. Ainsi le fer forgé, le fer passé à la filière, le fer fondu n'ont pas le même coefficient de dilatation, et il en est de même pour les autres métaux. Les corps solides qui n'ont pas, dans tous les sens, une structure homogène se dilatent inégalement selon le sens. Ainsi la dilatation du bois desséché n'est pas la même dans le sens des fibres et perpen-

diculairement à leur direction. Plusieurs des cristaux dou de la double réfraction ont des coefficients de dilatation in gaux, suivant que l'on considère la direction de leurs ax optiques, ou des directions obliques ou perpendiculaires au premières. D'après Mitscherlich et Fizeau, il en est mên quelques-uns qui, tout en augmentant de volume par la ch leur, se contractent dans un sens. Telle est la chaux carb natée ou spath d'Islande : tandis que, pour une élévation température d'un degré, ce cristal se dilate de 29 milli nièmes suivant l'axe optique, perpendiculairement à l'axe se contracte, et cette contraction s'élève à près de 6 milli nièmes. Un phénomène semblable a lieu dans l'émeraud dans le feldspath orthose. La différence de structure crista line dans les divers sens, que nous avons vue accusée da ces substances par les curieux effets de la double réfractio se manifeste ici sous une autre forme qui n'est pas moi intéressante.

Du reste, ces anomalies ne sont pas, nous venons de dire, des exceptions réelles à la loi de dilatation des solid par la chaleur, puisqu'en somme il y a accroissement de vo lume. Il n'en est pas de même pour l'iodure d'argent. D recherches très-intéressantes de M. Fizeau sur ce corps, résulte qu'il subit une contraction réelle à mesure q croît sa température, entre des limites d'ailleurs ass étendues, puisqu'elles embrassent 80 degrés de l'échel thermométrique. Bien plus, le cofficient de contraction - que les physiciens nomment le *coefficient négatif de dila tation* — est d'autant plus fort que la température est pl élevée.

Pendant quelque temps, on a cru que la glace ou l'eau sol difiée se contractait par l'élévation de température, et faisa ainsi exception au phénomène général de dilatation des cor solides. Il n'en est rien, et Brunner a trouvé que sa densi croît avec l'abaissement de température. Le coefficient de d latation de la glace, comme nous l'avons vu dans le tables

de la page 477, s'élève même à 53 dix-millionièmes, supérieur à celui du zinc, le plus dilatable des métaux.

Le bois et la plupart des substances organiques diminuent de volume quand ils s'échauffent, s'ils ne sont pas complétement desséchés ; mais il n'y a là qu'une exception apparente. La chaleur favorisant l'évaporation de l'eau que ces corps contiennent, en perdant de leur volume, ils perdent aussi de leur poids; d'ailleurs, en revenant par le refroidissement à leur température première, ils ne reprennent pas leur volume primitif. L'argile, même complétement desséchée, se contracte aussi, quand elle est soumise à une température croissante, et l'on s'est servi de cette propriété pour construire des pyromètres, instruments qui indiquent les températures des hauts fourneaux ; mais il est prouvé que cette contraction est due à un commencement de vitrification ou de combinaison chimique des éléments de l'argile, laquelle d'ailleurs, en se refroidissant, ne reprend pas non plus son volume antérieur.

§ III. MESURE DE LA DILATATION DES LIQUIDES ET DES GAZ.

La dilatation des liquides est plus considérable que celle des solides. Nous avons déjà vu que c'est sur la différence de dilatation du verre et du mercure, qu'est basée la construction des thermomètres ordinaires.

Comme les liquides dont on veut mesurer la dilatation sont nécessairement renfermés dans des vases ou enveloppes solides, qui changent eux-mêmes de volume quand on fait varier la température, il en résulte qu'il y a lieu de distinguer entre la *dilatation absolue*, c'est-à-dire l'augmentation réelle de volume du liquide, et la *dilatation apparente*, celle qu'on observe, par exemple, à l'aide d'un tube thermométrique divisé en parties d'égale capacité. La dilatation absolue d'un liquide est évidemment égale à sa dilatation apparente, augmentée de la dilatation de l'enveloppe.

Voici comment on a procédé pour mesurer la dilatatioı absolue des liquides. On a cherché d'abord, par des pro· cédés dont la description sortirait de notre programme la dilatation absolue du mercure; puis, en retranchant dı nombre trouvé la dilatation apparente du même liquide, on ε obtenu la dilatation du verre. Celle-ci une fois connue, la di· latation d'un liquide quelconque s'en déduisait par une mar· che inverse, c'est-à-dire en mesurant d'abord la dilatatioı apparente, et en y ajoutant la dilatation du verre ou de l'en· veloppe.

Les résultats obtenus ont fait voir, non-seulement que le: liquides se dilatent plus que les solides, mais encore que leur: coefficients de dilatation — il s'agit ici de la dilatation cu· bique — ne sont pas constants. Prenons quelques exemples.

M. Regnault est parvenu, en perfectionnant la méthode ima· ginée par Dulong et Petit, aux nombres suivants, qui repré· sentent le coefficient de dilatation absolue du mercure, c'est-à-dire la dilatation de l'unité de volume de ce liquide, pour une élévation de température d'un degré centigrade :

	Coefficient de dilatation cubique du mercure
Moyenne entre 0° et 100°	0,00018170
à 100°	0,00018306
à 200°	0,00018909
à 300°	0,00019413
à 350°	0,00819666

Ce coefficient va, comme on voit, en croissant avec la température; mais entre 0° et 100°, il est sensiblement constant et égal à $\frac{1}{5500}$; à 0°, il est $\frac{1}{5585}$. Telle est la fraction dont se dilate pour 1° un volume quelconque de mercure aux températures indiquées.

L'eau, l'alcool se dilatent plus que le mercure entre 0° et les températures 100° et 80°, qui sont celles de leur ébullition. De plus, le premier de ces liquides offre une anomalie qui mérite l'attention. Entre la température de la glace fondante

et 4°, l'eau, au lieu de se dilater, diminue de volume ; à cette dernière température, elle atteint son maximum de condensation. Chauffée au-dessus de 4°, elle va en se dilatant sans cesse jusqu'à 100°. Voici, d'après M. Despretz, qui a fait une étude très-complète de la dilatation de l'eau et de sa contraction dans le voisinage de 0°, les volumes et les densités de l'eau à diverses températures :

Températures.	Volumes.	Densité.
0°	1,0001269	0,999873
1°	1,0000730	0,999927
2°	1,0000331	0,999966
3°	1,0000083	0,999999
4°	1,0000000	1,000000
5°	1,0000082	0,999999
6°	1,0000309	0,999969
7°	1,0000708	0,999929
8°	1,0001216	0,999878
100°	1,0431500	0,958634

On peut mettre en évidence, d'une façon très-simple, la contraction de l'eau qu'on chauffe de 0° à 4°. On entoure d'un manchon rempli de glace, le haut d'une éprouvette, pleine d'eau à une température supérieure à 4° (fig. 297). Les couches supérieures de l'eau se refroidissent peu à peu et d'une manière continue, et le thermomètre qui s'y trouve plongé s'abaisse au-dessous de 4° jusqu'à 0° ; tandis que le thermomètre inférieur, après s'être abaissé à 4°, reste stationnaire. Cette expérience montre que les couches les plus élevées, en se refroidissant jusqu'à 4°, devenant plus lourdes que les couches inférieures, tombent au fond de l'éprouvette et sont remplacées par celles-ci, que la glace refroidit à son tour. Mais quand leur température est plus basse que 4°, elles restent


Fig. 297. — Expérience prouvant que l'eau se contracte de 0° à 4°.

à la partie supérieure, comme le prouvent les indications des deux thermomètres.

Les gaz se dilatent beaucoup plus que les solides et les liquides sous l'action de la chaleur : un ballon de verre, une enveloppe en baudruche remplie d'air ou d'un autre gaz éclatent, quand on les chauffe un peu fortement. Comme, d'après la loi de Mariotte, le volume d'un gaz change aussi par la pression, il faut, pour que son coefficient de dilatation ait une valeur définie, qu'on ait soin d'indiquer à quelle pression il se trouve soumis. C'est à la pression atmosphérique de 760mm qu'on rapporte ordinairement ces coefficients. Gay-Lussac, en ayant déterminé un grand nombre pour des températures comprises entre 0° et 100°, était arrivé à ce résultat remarquable que le coefficient de dilatation est le même pour tous les gaz, simples, mélangés ou combinés. D'après cet illustre physicien, un volume de gaz, en s'échauffant de 1 degré centigrade, augmentait de la 267e partie de sa valeur : un décimètre cube d'air, en passant de 0° à 100°, se dilate donc de 37 centimètres cubes, de plus du tiers de son volume à 0°. Le nombre que nous venons de rapporter est un peu trop fort, comme l'ont prouvé les belles recherches de M. Regnault, qui a fait voir en même temps que la loi de Gay-Lussac n'est pas absolue. L'air, l'azote, l'hydrogène, l'oxyde de carbone ont, à très-peu de chose près, le même coefficient de dilatation, qui est de 0.00366, c'est-à-dire égal à la fraction $\frac{1}{273}$. Mais celui des autres gaz est notablement différent : ainsi, pour le cyanogène, il est égal à 0.00388 ou à la fraction $\frac{1}{258}$. Du reste, plus la pression à laquelle les différents gaz sont soumis est faible, plus ils sont dilatés, plus leurs coefficients de dilatation s'approchent de l'égalité; alors, la loi de Gay-Lussac se trouve sensiblement vérifiée.

Nous verrons plus tard que la dilatation de l'air et des gaz par la chaleur permet d'expliquer plusieurs phénomènes météorologiques. Elle est aussi le principe de nombreuses appl

cations, parmi lesquelles nous nous bornons à citer pour le moment les montgolfières, les calorifères à air chaud, et les machines à air dilaté.

§ IV. CHANGEMENTS D'ÉTAT DES CORPS. — FUSION, SOLIDIFICATION OU CONGÉLATION.

Nous savons tous qu'une masse d'eau, liquide à certaines températures, est susceptible de passer à l'état solide, quand sa température s'abaisse au-dessous d'une certaine limite; elle devient morceau de glace sans changer pour cela de nature, c'est-à-dire sans cesser d'être formée des mêmes éléments chimiques associés. En revenant à sa température primitive, elle reprend l'état liquide; et si alors on la chauffe à 100°, sous la pression atmosphérique de 760^{mm}, elle se réduit en vapeur. Ainsi l'eau, et la plupart des liquides sont dans le même cas, peut affecter les trois états, solide, liquide et gazeux.

Les corps solides à une température ordinaire, les métaux par exemple, changent aussi d'état, quand on les soumet à une chaleur suffisamment grande : ils se liquéfient et même se réduisent en vapeur. Le refroidissement produit des phénomènes inverses, de sorte qu'un gaz arrive à passer à l'état liquide, et, de là, à l'état solide.

Ces divers changements d'état s'effectuent dans des conditions qui varient avec la nature des substances, mais qui néanmoins sont soumises à certaines lois communes dont nous allons parler. Auparavant, énumérons les changements d'état des solides, des liquides et des gaz qui peuvent se produire sous l'influence des variations de la chaleur.

L'augmentation de la chaleur produit dans les solides le passage à l'état liquide, ce qu'on nomme la *fusion;* dans les liquides, elle donne lieu au passage à l'état gazeux ou *vaporisation;* nous verrons plus loin la distinction qu'on doit faire entre la vaporisation et l'*évaporation*, qui désigne aussi le changement d'un liquide en gaz ou en vapeur.

Le refroidissement produit dans les gaz le passage à l'é liquide : c'est la *liquéfaction ;* et dans les liquides, le retou l'état solide, qu'on nomme tantôt *solidification*, tantôt *cong lation.*

La fusion des divers corps solides a lieu à des températu qui diffèrent beaucoup les unes des autres. Ainsi, tandis q la glace fond à 0°, le soufre à 125°, le plomb à 322°, il fa une température de 1500° pour fondre le fer, et de p de 2000° pour fondre le platine. Mais une circonstance co mune à tous les solides, c'est que la température de fusion fixe pour chacun d'eux; de plus, pendant tout le temps q lieu le passage d'une masse solide à l'état liquide, la temp rature de la masse reste la même, quelle que soit l'intensité foyer de chaleur qui détermine la fusion. C'est cette propri qui a été utilisée, on doit se le rappeler, pour marquer le po fixe 0° des thermomètres. Le seul effet que produise une au mentation dans la chaleur du foyer, c'est une rapidité p grande dans la fusion du corps solide.

Le passage à l'état liquide de la plupart des solides se brusquement; ainsi la glace, le soufre, les métaux prenn immédiatement toute leur fluidité. D'autres substances, contraire, commencent par se ramollir; elles deviennent v queuses ou pâteuses, avant d'être tout à fait fluides; le ve est dans ce cas, ce qui permet de le travailler avec facilité, le souffler, de l'étirer, en un mot de lui donner toutes formes dont on a besoin.

Jadis, on ne savait pas produire des températures assez é vées pour fondre certains corps, qu'on appelait pour ce raison *réfractaires* ou *fixes*. Aujourd'hui le nombre de substances est considérablement restreint, et l'on a obtenu fusion des roches considérées autrefois comme infusibl Despretz est même parvenu à déterminer dans le charb de bois, le plus réfractaire des corps connus, un comme cement de fusion. D'autres solides sont infusibles, parce c

la chaleur les décompose : la craie, la houille, le marbre sont dans ce cas. Cependant, en enfermant dans un cylindre de fer hermétiquement bouché, un morceau de marbre, et en le soumettant alors à une température élevée, on peut fondre une certaine portion de ce solide. La chaleur commence par décomposer une partie du marbre en acide carbonique et en chaux; le gaz, par sa force élastique, empêche la décomposition de continuer, et le marbre qui reste, se fond partiellement sous l'action de la chaleur.

La dilatation que subit un corps solide sous l'influence de l'augmentation de la chaleur, continue généralement jusqu'à la température de la fusion. En ce point, elle a lieu d'une façon plus brusque encore; de sorte que la masse liquéfiée a un volume supérieur à celui du solide qui a changé d'état. Il y a quelques exceptions à cette loi : nous aurons l'occasion d'y revenir tout à l'heure, en parlant de la solidification des corps liquides. Il y a, entre ce dernier phénomène et celui que nous venons d'étudier, une relation qu'on pouvait prévoir. Ils s'effectuent l'un et l'autre, pour la même substance, à la même température fixe : en un mot, le point de solidification est le même que le point de fusion. Ainsi l'eau passe à l'état de glace, quand sa température s'abaisse à 0°; le plomb se solidifie, en se refroidissant à 322°, le soufre à 115°, le fer à 1500°, le platine à 2000°. Et, autre similitude, la température de la masse liquide reste constante, pendant tout le temps que dure la solidification; un refroidissement plus intense rend le passage à l'état solide plus rapide, mais il ne sert point à abaisser la température de la masse.

On dit plus particulièrement qu'il y a *congélation*, quand la solidification s'opère à une basse température, par exemple, au-dessous de 0°. L'eau se congèle à 0°, le mercure à 39° au-dessous de 0°. Divers liquides, tels que le sulfure de carbone, l'alcool absolu, n'ont pu encore être solidifiés, bien qu'à l'aide de mélanges réfrigérants on ait pu abaisser leur température jusqu'à 80 degrés au-dessous de 0°.

On vient de voir que la température du point de fusion d solides est la même que la température de solidification. C pendant, on peut, dans certaines circonstances, abaisser la te pérature d'une masse liquide au-dessous de ce point, sa qu'elle se solidifie. De l'eau, par exemple, enfermée dans vase, à l'abri de l'agitation de l'air, peut rester liquide jusq une température de 20° au-dessous de 0°. Il faut pour ce qu'elle soit très-limpide, qu'on la maintienne en repos, et q le refroidissement s'effectue avec lenteur. Mais, quand elle dans cet état, il suffit de la moindre agitation ou de la proje tion d'un petit fragment de glace, pour que la congélation fasse brusquement et dans toute la masse à la fois. Alo chose remarquable, il y a un dégagement de chaleur, et congélation se fait à la température de 0°, comme dans circonstances ordinaires.

Un corps solide, en se fondant, se dilate brusquement; c' le phénomène inverse qui doit avoir lieu, si la masse liqui se solidifie : l'expérience montre, en effet, qu'elle diminue volume. Mais ce n'est pas là une loi générale, car il y a exce tion pour l'eau, pour la fonte de fer, le bismuth et l'antimoi Ces différents corps se dilatent, au contraire, en se soli fiant. Cette propriété de la fonte de fer est utilisée da l'industrie, et permet de reproduire avec plus de netteté et perfection la forme des moules dans lesquels on coule ce substance.

Nous savions déjà que l'eau se dilate, en se refroidiss depuis 4° jusqu'à 0°, de sorte que la dilatation subite qu'e éprouve en se congelant semble la continuation du mê phénomène, et rend probable l'explication qu'on en donn on l'explique par la disposition nouvelle que prennent les m lécules dans le voisinage du point où leur cristallisation s'opè Quand le passage à l'état solide s'effectue, la dilatation soudaine et s'effectue avec une force irrésistible, ainsi que montre l'expérience suivante, dont nous empruntons la d cription aux leçons de Tyndall sur la Chaleur : « Pour don

un exemple de cette énergie, dit-il, j'ai enfermé de l'eau dans une bouteille de fer. Le fer est épais de plus d'un centimètre et demi, et la quantité d'eau est relativement petite, quoique suffisante pour remplir la bouteille. La bouteille est fermée par un bouchon fortement vissé sur son goulot. Voici une seconde bouteille toute semblable et préparée de la même manière. Je les place toutes deux dans ce vase de cuivre, et je les entoure d'un mélange réfrigérant. Elles se refroidissent graduellement; l'eau qu'elles contiennent approche de son maximum de densité; sans doute, en ce moment, l'eau ne remplit pas tout à fait les bouteilles, un petit vide existe à l'intérieur. Mais bientôt la contraction cesse, et la dilatation commence; l'espace vide se remplit lentement, l'eau passe graduellement de l'état liquide à l'état solide; dans ce passage, elle a besoin d'un espace plus grand que le fer rigide lui refuse. Mais la rigidité du fer est impuissante à lutter contre les forces moléculaires.... Vous entendez ce bruit : la première bouteille est brisée par les molécules cristallisées; la seconde a subi le même sort, et voici les fragments des deux vases, témoins irrécusables de leur épaisseur, témoins très-frappants aussi de l'incroyable énergie qui les a produits. »

Des bombes pleines d'eau, et dont le trou de fusée est bouché énergiquement par des bouchons de fer, furent exposées à la gelée. L'un des bouchons fut lancé à 150 mètres, et il sortit un long cylindre de glace de l'ouverture (fig. 298). L'autre bombe fut brisée et, par la fente, on vit sortir un bourrelet de glace. Cette expérience, rapportée par M. Daguin, dans son *Traité de Physique*, est due au major d'artillerie Edward William, qui la fit à Québec.

On obtient des résultats semblables avec le bismuth : une bouteille de fer remplie de ce métal fondu, fermée avec un bouchon à vis, éclate, quand le métal en se refroidissant arrive à se solidifier; la dilatation brusque que détermine le changement d'état développe une force expansive si considérable, que l'enveloppe ne peut résister et se brise.

La dilatation de l'eau, au moment où elle se congèle, explique la rupture des tuyaux de conduite par les temps de gelée ; on ne s'aperçoit de l'accident qu'au dégel, parce que tant que



Fig. 298. — Effets de la dilatation produite par la congélation de l'eau.

l'eau reste à l'état de glace dans les conduits, aucune fuite ne peut se manifester : au contraire, dès que le dégel arrive, l'eau s'écoule par les fentes des tuyaux.

§ V. CHANGEMENTS D'ÉTAT DES CORPS. — VAPORISATION. LIQUÉFACTION.

Pour passer à l'état de gaz ou de vapeur, la plupart des corps solides doivent être préalablement fondus ou liquéfiés. Cependant, le camphre, l'iode, l'arsenic et quelques autres substances diminuent de poids à l'air libre, sans passer par l'état liquide. La neige, la glace sont dans le même cas : tout le monde a pu observer ce fait par les temps secs et de forte gelée : des fragments de glace ou des monceaux de neige diminuent sensiblement de volume, ou même disparaissent tout à fait, sans qu'il y ait eu aucune fusion partielle.

Quant aux liquides, la plupart se réduisent spontanément en vapeur, à des températures très-différentes. L'eau, qu'on place dans un vase ouvert, peu à peu disparaît; les objets

mouillés se sèchent avec une rapidité d'autant plus grande que la température est plus élevée et l'air environnant moins humide; placés dans un courant d'air, l'eau dont ils sont imbibés se réduit encore plus vite en vapeur. Le mercure, aux températures ordinaires, s'évapore : c'est ce que Faraday a mis hors de doute par l'expérience suivante : il suspendit une feuille d'or dans un flacon contenant du mercure; et au bout de quelque temps, il trouva la feuille blanchie. Le mercure s'était combiné avec l'or, ce qui ne pouvait avoir eu lieu que par l'évaporation du premier.

Ce premier mode de passage des liquides à l'état gazéiforme est ce qu'on nomme l'*évaporation*. Il est caractérisé par ce fait qu'il a lieu, pour un même liquide, à une température quelconque, et que c'est seulement par les couches superficielles qu'il s'effectue. La *vaporisation*, au contraire, est la réduction en vapeur sous l'influence d'une élévation de température, au moment où cette température atteint une limite fixe, déterminée pour chaque liquide, et constante pour une même pression extérieure. Le liquide alors entre en *ébullition*, c'est-à-dire que sa masse est agitée par le passage des bulles de vapeur qui s'échappent des parois du vase qui le contient, et que leur légèreté spécifique élève à la surface.

La température à laquelle un liquide entre en ébullition est, venons-nous de dire, une température fixe, pour de mêmes pressions : il faut ajouter, si le liquide est toujours contenu dans un vase de même substance. L'eau bout à 100°, à la pression barométrique de 760 millimètres dans un vase métallique; dans un vase de verre, elle ne bout guère qu'à 101°, comme l'a montré Gay-Lussac, ce qui vient probablement d'une adhérence plus forte des molécules liquides pour cette dernière substance. De plus, la température de l'ébullition reste constante, pendant tout le temps que dure la vaporisation de la masse liquide; seulement, si l'on emploie une chaleur plus intense, le passage à l'état de vapeur s'effectue avec plus de rapidité.

Voici à quelles températures a lieu la vaporisation, toujours accompagnée d'ébullition, de quelques liquides :

Éther chlorhydrique..........	11°
Alcool........	80°
Eau........................	100°
Acide sulfurique concentré....	325°
Mercure....................	350°
Soufre.	400°

Étudions avec plus de détails ce phénomène curieux de l'ébullition des liquides, et prenons pour exemple le liquide le plus facile à se procurer, l'eau.

Quand on élève la température d'un vase rempli d'eau en le faisant chauffer sur le feu, c'est le fond et les parois du vase qui reçoivent les premiers l'action des charbons ardents. La chaleur reçue se communique à la masse liquide, qui commence par s'évaporer à la surface cette évaporation étant, comme nous l'avons vu plus haut, d'autant plus active que la température de l'eau s'approche plus de celle de l'ébullition Arrive un moment où la vapeur se forme contre les parois intérieures, au fond et sur les côtés du vase. Les bulles ainsi formées ont une force élastique ou expansive, qui, jointe à leur légèreté spécifique, tend à les faire remonter à la surface du liquide. Mais le poids des couches d'eau et la pression atmosphérique s'opposent à cette ascension, qu n'a lieu effectivement que quand la force élastique de la vapeur atteint une valeur égale à la somme de ces deux pressions Alors commence un mouvement tumultueux, dû à la traversée des bulles qui viennent crever à la surface du liquide. Un peu



Fig. 299. — Ébullition à l'air libre.

avant l'ébullition, on entend un bruit particulier : on dit alors que l'*eau chante*. On explique ce bruit de la façon suivante : à l'origine les bulles de vapeur, en montant à la surface, traversent des couches de moins en moins chaudes; la vapeur dont elles sont formées se refroidit et se condense, et l'eau se précipite, pour remplir les vides qui se forment. Mais en cédant leur chaleur aux couches supérieures de l'eau, celles-ci atteignent bientôt la température des couches du fond, et le bruit cesse, parce que la cause de la condensation des bulles a disparu. L'observation de la forme des bulles de vapeur confirme cette explication : elles montent d'abord sous forme de cônes qui s'amincissent à la partie supérieure; quand l'ébullition est complète, au contraire, les bulles montent sous forme de cônes évasés par le haut, parce qu'au lieu de se condenser, elles se dilatent à mesure qu'elles ont à vaincre des pressions plus faibles du liquide qui les surmonte.

L'expérience prouve que, pendant toute la durée de l'ébullition d'un liquide, la tension élastique de la vapeur qui se forme est précisément égale à la pression extérieure. Et comme, ainsi que nous le verrons tout à l'heure, cette même tension croît avec la température, il en résulte que la température d'ébullition d'un liquide est d'autant plus basse, que la pression est plus faible, d'autant plus élevée au contraire que la pression extérieure est plus considérable. Ainsi, sous la pression de 760^{mm}, l'eau bout à 100°. De Saussure ayant fait bouillir de l'eau au-dessus du Mont-Blanc, trouva 86° pour la température de l'ébullition, la pression barométrique étant 434^{mm}. Bravais et Martins firent des expériences semblables et trouvèrent, aux Grands-Mulets, sur les flancs du même mont, 90° sous une pression de 529^{mm}, et, au sommet même du Mont-Blanc, 84°,4 pour une pression de 424^{mm}.

Un appareil qu'on nomme *marmite de Papin*, du nom de l'inventeur, permet d'élever la température de l'ébullition de l'eau, en accroissant à volonté la pression sur la surface du liquide. C'est la vapeur formée par l'eau chauffée qui, en s'accu-

mulant au-dessus de la surface, accroît la pression sur le liquide, et l'empêche de bouillir. La marmite de Papin se compose d'un vase cylindrique en fer ou en bronze, aux parois épaisses et résistantes, fermé par un couvercle de même métal, qu'une vis de pression maintient appuyé contre les bords de l'ouverture (fig. 300). Un trou pratiqué dans le couvercle laisse échapper la vapeur, toutes les fois que sa tension dépasse une certaine limite, qu'on fixe à volonté de la manière suivante : Le trou du couvercle est fermé par le bras d'un levier, à l'extrémité duquel est un poids qui agit avec une force proportionnée à sa masse et à la longueur du bras de levier. On peut donc régler d'avance la limite de la force élastique de la vapeur, ou, ce qui revient au même, celle de la température de l'eau contenue dans le cylindre. On peut ainsi faire bouillir l'eau à une température constante dépassant de beaucoup 100°, capable, par exemple, de faire fondre de l'étain, du bismuth, du plomb. On utilise la marmite de Papin, pour faire dissoudre ou cuire dans l'eau des substances, qui exigent pour cela une température supérieure à celle de l'ébullition à l'air libre sous la pression ordinaire de l'atmosphère.



Fig. 300. — Marmite de Papin.

L'ébullition des liquides a lieu, avons-nous dit, à des températures d'autant plus basses que la pression est moindre. En plaçant sous le récipient de la machine pneumatique un vase contenant de l'eau à une température inférieure à 100°, on voit le liquide entrer en ébullition, dès que, par la raréfaction de l'air, sa pression s'est abaissée au niveau de la force élas-

tique de la vapeur d'eau à cette température. La vapeur ainsi formée s'accumule au-dessus de la surface du liquide, et, par sa pression croissante, finit par arrêter l'ébullition. Si alors on refroidit le récipient à l'aide de linges mouillés, l'abaissement de température condense une partie de la vapeur dont la pression diminue, et l'ébullition recommence.

On peut faire l'expérience sans avoir recours à la machine pneumatique. L'eau, contenue dans un ballon à long col, est d'abord soumise à une ébullition assez prolongée, pour que l'air soit chassé par la vapeur qui se forme. On bouche le flacon, on le retire du feu, et pour éviter la rentrée de l'air, on plonge le col dans l'eau (fig. 301). La vapeur qui reste au-dessus du liquide a une tension assez forte pour faire obstacle à l'ébullition; mais si l'on refroidit le ballon en y versant de l'eau froide, ou en mettant en contact avec son sommet des morceaux de glace, la vapeur se condense et l'ébullition recommence. Il semble ainsi qu'on fasse *bouillir de l'eau en la refroidissant*.


Fig. 301. — Ébullition de l'eau à une température inférieure à 100°.

Pour bien comprendre les conditions dans lesquelles a lieu le dernier changement d'état qui nous reste à étudier, la *liquéfaction des gaz,* il est indispensable de connaître les lois de la formation des vapeurs dans le vide, lois dont la démonstration expérimentale est due au physicien Dalton. Voici quelles sont ces lois.

Si l'on introduit dans le vide barométrique un certain volume d'un liquide quelconque, un centimètre cube d'alcool, je

suppose, aussitôt on voit le niveau du mercure se déprimer et s'arrêter à un point *b*, dont la distance au niveau *a* d'un baromètre qui plonge dans la même cuvette que le premier tube, mesure la tension ou la force élastique de la vapeur formée. Par là, nous voyons déjà que, dans le vide, les liquides se réduisent spontanément en vapeur.



Fig. 302. — Évaporation spontanée d'un liquide dans le vide barométrique. Première loi de Dalton.



Fig. 303. — Invariabilité de la tension maximum d'une même vapeur à la même température. Seconde loi de Dalton.

Supposons qu'une petite couche de liquide ait surnagé sur le mercure. Si l'on soulève alors le tube, sans que sa partie inférieure cesse de plonger dans la cuvette, on remarque que le niveau reste en *b*, à la même hauteur qu'auparavant. Mais la couche liquide d'alcool diminue d'épaisseur, à mesure qu'augmente l'espace qu'occupe la vapeur. Une nouvelle quantité de vapeur s'est donc formée, sans que sa tension ait

changé, et il en est ainsi jusqu'à ce que tout le liquide se soit évaporé. Dans ce cas, si l'on continue à soulever le tube ou à augmenter l'espace que peut occuper la vapeur, le niveau du mercure s'élèvera, ce qui prouve que la tension de la vapeur diminue. Abaisse-t-on de nouveau le tube, le niveau baisse et revient au point *b;* mais si alors on continue le même mouvement, le niveau reste constant, en même temps qu'une portion croissante de la vapeur repasse à l'état liquide.

La figure 303 représente trois tubes barométriques dont la chambre est remplie de la vapeur d'un même liquide; tant que celle-ci reste en contact avec le liquide même, sa tension ne varie pas, comme le prouve l'égalité de niveau du mercure dans les trois tubes.

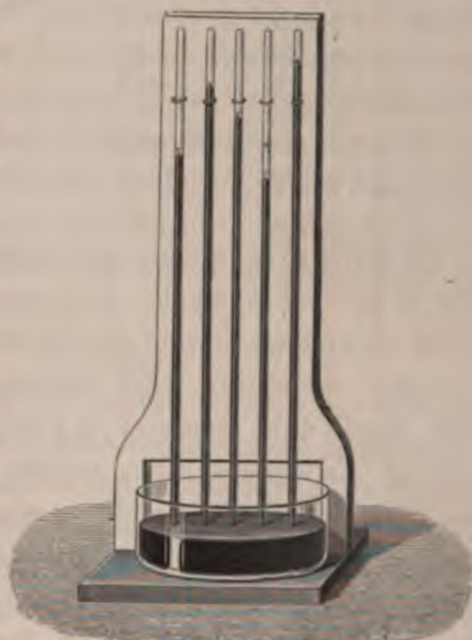


Fig. 304. — Inégalités des tensions maximums de diverses vapeurs à la même température. Troisième loi de Dalton.

De cette première expérience, Dalton a conclu : 1° qu'un liquide placé dans le vide se vaporise spontanément; 2° que la vapeur ainsi formée atteint un degré de tension maximum qui reste invariable, tant qu'un excès de liquide reste en contact avec l'espace rempli de vapeur. On dit alors que l'espace est *saturé* de vapeur.

En faisant l'expérience avec des liquides de diverses natures, eau, alcool, éther, etc.... on trouve que la tension maximum varie d'un liquide à l'autre, pour une même température, comme le montrent les niveaux différents des tubes barométriques dans la figure 304. Si l'on fait varier la température,

les phénomènes se produisent dans le même ordre; mais la tension maximum va en croissant rapidement.

Voici un tableau qui donne les tensions de la vapeur d'eau dans le vide, à diverses températures, tensions exprimées soit par le nombre de millimètres de mercure auquel elles feraient équilibre dans un tube barométrique, soit par le nombre d'atmosphères de 760 millimètres :

Températures.	Tensions. mm.	Températures.	Tensions.
— 10°	2,1	+ 120°	2 atmosphères.
0°	4,6	+ 134°	3 —
+ 10°	9,2	+ 144°	4 —
+ 20°	17,4	+ 152°	5 —
+ 30°	31,6	+ 180°	10 —
+ 40°	55,0	+ 212°	20 —
+ 50°	92,0	+ 252°	40 —
+ 100°	760,0	+ 266°	50 —

On voit par ce tableau qu'à la température ordinaire, entre 10° et 30° par exemple, le maximum de tension de la vapeur d'eau dans le vide ne dépasse pas 32 millimètres. Une pression supérieure à 32 millimètres, à la température de 30°, ferait donc repasser à l'état liquide une partie de la vapeur. Cependant, nous voyons l'eau se réduire spontanément en vapeur à l'air libre, sous une pression bien supérieure, puisqu'elle est en moyenne de 760^{mm}. Il y a là une apparente anomalie, qui tient à la tendance qu'ont les gaz à se mélanger en vertu de la force expansive qui leur est propre. L'air presse à la vérité à la surface de l'eau; mais comme l'air est un corps poreux, que ses molécules laissent entre elles des espaces vides, les molécules de vapeur aqueuse se précipitent dans ces intervalles et se mélangent ainsi au gaz dont l'atmosphère est formée.

Les lois des mélanges des gaz et des vapeurs ont été étudiées par Gay-Lussac qui a démontré que, si un espace plein de gaz est saturé par la vapeur d'un liquide quelconque, la

tension maximum de cette vapeur est précisément celle qu'elle possède dans le vide à la même température. Plus la température est élevée, plus un espace, soit vide, soit rempli de gaz, exige de vapeur pour être saturé. Ainsi, en été, par un temps très-chaud, il y a souvent plus de vapeur d'eau dans l'air qu'en hiver par un temps humide et froid. Ce fait étonne bien des gens qui considèrent les nuages ou les brouillards comme formés de vapeur d'eau. Ces personnes se trompent : la vapeur d'eau est toujours parfaitement invisible et transparente; les gouttelettes très-ténues dont les brouillards et les nuages sont formés sont de l'eau à l'état liquide, non de la vapeur; ou, si l'on veut, c'est de la vapeur d'eau qu'un abaissement de température a condensée. Il y a, il est vrai, des liquides dont la vapeur est visible, l'iode par exemple. Mais cela vient de ce que cette vapeur n'est pas incolore comme celle de l'eau; elle est d'un beau violet pourpré. De même, la vapeur de chlore est visible, à cause de sa couleur jaune-verdâtre, celle du brôme par sa couleur rouge-brun.

Quand un gaz ou une vapeur remplit un espace fermé, on peut obtenir sa liquéfaction de deux manières, soit en abaissant sa température, soit en diminuant son volume. Mais il faut, pour que le liquide apparaisse, que l'espace soit préalablement saturé, et c'est encore par les mêmes moyens, refroidissement ou compression, qu'on obtient cet état de saturation. Comme on entend par vapeur l'état d'une substance qui était préalablement à l'état liquide, il n'y a aucune difficulté, on le comprend, à liquéfier une vapeur quelconque : il suffit de la replacer dans les conditions de température et de pression où était la substance, quand elle se présentait à l'état liquide.

Les gaz ont offert, pour leur liquéfaction, des difficultés qui peu à peu ont été levées. Le gaz ammoniac, le chlore, le gaz acide carbonique, le protoxyde d'azote ont pu être réduits à l'état liquide et même, à l'exception du chlore, solidifiés, grâce à l'emploi d'énergiques moyens de compression et de refroi-

dissement. Cinq gaz seulement n'ont pu jusqu'à présent être liquéfiés par les moyens connus; ce sont : l'hydrogène, l'oxygène, l'azote, l'oxyde de carbone et le bioxyde d'azote; une température de 110° au-dessous de zéro, combinée avec des pressions de 30 à 50 atmosphères, les a laissés à l'état gazeux : c'est pour cela qu'on les nomme des *gaz permanents*. Mais l'induction autorise à penser qu'il serait possible de les amener, comme les autres gaz, à l'état liquide, en employant des moyens encore plus énergiques.

CHAPITRE II.

PROPAGATION DE LA CHALEUR.

§ I. CHALEUR RAYONNANTE.

En décrivant les effets de la chaleur sur les corps, effets qui modifient leurs volumes ou changent leur état physique, nous n'avons rien dit de la manière dont s'effectue le passage de la chaleur, de la source au corps échauffé. Quand deux corps sont en présence, soit au contact, soit à distance, l'expérience prouve qu'il y a entre eux échange de chaleur, pour peu que leurs températures soient inégales, de sorte que chacun d'eux est une source de chaleur pour l'autre; mais, le plus souvent, on réserve le nom de source calorifique à celui des deux corps qui a la température la plus élevée. Ce que nous avons à étudier maintenant, ce sont les divers modes de propagation de la chaleur, quand elle passe d'une source à un corps qui en est plus ou moins éloigné, ou qu'elle se propage dans divers milieux.

L'expérience nous montre deux modes principaux de propagation de la chaleur; en voici des exemples que l'on pourra aisément multiplier, en se reportant aux observations que chacun de nous a l'occasion de faire tous les jours. Quand on tient à la main, par une de ses extrémités, une barre de fer froide et qu'on met au feu l'autre bout, il s'écoule un certain temps avant que la chaleur du foyer, se propageant successivement le long de la barre, vienne se faire sentir à notre organe; plus la barre est courte, moins cet intervalle de temps

est long, et d'ailleurs l'intensité de la chaleur ainsi propagée va en croissant à partir du moment de la première impression, si l'on maintient la barre dans le foyer. Ici, la chaleur a cheminé tout le long du métal et de molécule à molécule; c'est par l'intermédiaire des parties matérielles qu'elle a été ainsi conduite d'une extrémité à l'autre de la barre de fer, et enfin transmise à la main par le contact. C'est un exemple de propagation de la chaleur par *conductibilité*. C'est de la même façon que s'élève la température des parois extérieures d'un vase, à l'intérieur duquel on a versé de l'eau chaude.

Il n'en est plus ainsi, quand la chaleur du foyer incandescent se communique au visage d'une personne qui vient d'enlever brusquement l'écran à l'aide duquel elle se préservait d'abord de la température de la source. Dans ce cas, la rapidité de l'impression subie nous prouve, que ce n'est pas en échauffant de proche en proche l'air interposé entre le feu et le visage que la chaleur du foyer s'est propagée, mais par un mode de mouvement analogue à celui de la lumière émanée d'une source. On dit alors que la chaleur se propage par *rayonnement*, et l'on appelle *chaleur rayonnante* celle qu'envoient les sources par ce mode de transmission à distance.

En résumé, quand une source de chaleur se trouve en présence et à une certaine distance d'un corps, elle peut de deux manières en élever la température : soit en échauffant d'abord successivement, molécule à molécule, toutes les parties matérielles qui se trouvent interposées entre le corps et la source; soit en échauffant directement le corps, sans que l'élévation de température des parties intermédiaires soit une condition nécessaire à l'élévation de température du corps. La chaleur se propage par *conductibilité* dans le premier cas; dans le second, c'est par *rayonnement*.

Comme tous les autres modes de propagation de la chaleur peuvent se ramener à l'un ou à l'autre de ceux-ci, ou à leur combinaison, nous allons les étudier chacun à leur tour. Commençons par la chaleur rayonnante.

L'action des rayons solaires, qui se fait sentir à une distance de 37 millions de lieues, prouve que la chaleur n'a pas besoin, pour se propager, de l'intermédiaire d'un milieu pondérable; et en réalité, quand après avoir franchi les espaces interplanétaires, elle traverse l'atmosphère et arrive à la surface du sol, elle échauffe celui-ci directement, sans avoir élevé d'une manière sensible la température des couches supérieures de l'air, ainsi que le prouve le froid qui règne dans les hautes régions de l'air et sur les montagnes élevées.

La chaleur rayonne de tous les corps incandescents que nous pouvons observer à la surface de la Terre, de la même façon que la chaleur émanée du Soleil. La chaleur obscure jouit aussi de la même propriété, c'est-à-dire se propage d'un point de la source à une distance quelconque, par rayonnement direct, sans que l'échauffement des points intermédiaires soit une condition de la propagation. Une expérience de Rumford a mis ce résultat hors de doute. Il construisit un baromètre dont le tube était terminé, à sa partie supérieure, par un ballon au centre duquel aboutissait la boule *a* d'un thermomètre : le ballon formait ainsi la chambre barométrique de l'instrument, de sorte que sa capacité était entièrement vide de matière pondérable (fig. 305). Ayant alors fermé au chalumeau, et détaché le ballon, il plongea la partie inférieure de ce dernier dans l'eau bouillante : à l'instant, le thermomètre monta, effet qui ne pouvait être attribué qu'au rayonnement, dans le vide, de la chaleur communiquée par l'eau à la paroi intérieure du ballon.



Fig. 305. — Rayonnement de la chaleur obscure dans le vide.

Ainsi les sources de chaleur obscure rayonnent comme les sources de chaleur lumineuse.

§ II. RÉFLEXION DE LA CHALEUR.

Nous allons voir maintenant se manifester une analogie complète entre les phénomènes de la chaleur rayonnante et ceux de la lumière, les mêmes lois régir les uns et les autres, de sorte que les radiations lumineuses et les radiations calorifiques sembleront produites par des mouvements de même nature, ainsi que le faisait déjà prévoir l'existence de rayons de chaleur au delà du rouge, dans le spectre solaire.

Comme la lumière, la chaleur rayonnante se propage en ligne droite dans les milieux homogènes; si donc, on interpose entre une source de chaleur et l'une des boules du thermomètre différentiel de Leslie une suite d'écrans percés chacun d'un trou, l'instrument ne marquera d'élévation de température qu'autant que les trous des écrans seront placés en ligne droite. Cette expérience prouve en outre qu'il existe des corps dont la nature est telle, que la chaleur rayonnante ne les traverse pas : on les nomme *athermanes*. D'autres substances sont *diathermanes*, c'est-à-dire se laissent traverser avec plus ou moins de facilité par les rayons de chaleur; telles sont en général les substances transparentes, l'air et les autres gaz; mais il y a aussi des corps opaques qui se laissent traverser par la chaleur rayonnante et sont diathermanes.

La vitesse de propagation de la chaleur rayonnante est aussi grande que la vitesse de la lumière. Une première série d'expériences a démontré d'abord qu'il n'y a pas d'intervalle appréciable, entre le moment où l'on enlève un écran interposé entre une source de chaleur et un thermoscope très-sensible, et celui où l'instrument marque l'élévation de la température. Mariotte opéra ainsi à plus de 100 mètres, Pictet à 23 mètres. Mais ces expériences prouvaient seulement que la vitesse de la chaleur rayonnante est grande, sans en donner la mesure. Depuis, on est parvenu à prouver qu'il n'y a pas de différence

sensible entre la vitesse des radiations calorifiques obscures du spectre solaire et celle des radiations lumineuses.

La chaleur rayonnante se réfléchit à la surface des corps, comme la lumière et en suivant les mêmes lois. Pour s'assurer de cette identité, il suffit de faire voir que les effets d'une source rayonnante placée dans les mêmes conditions qu'une source de lumière sont analogues aux effets lumineux de réflexion. Ainsi, deux miroirs paraboliques étant donnés, si on les place en regard l'un de l'autre, de façon que leurs axes

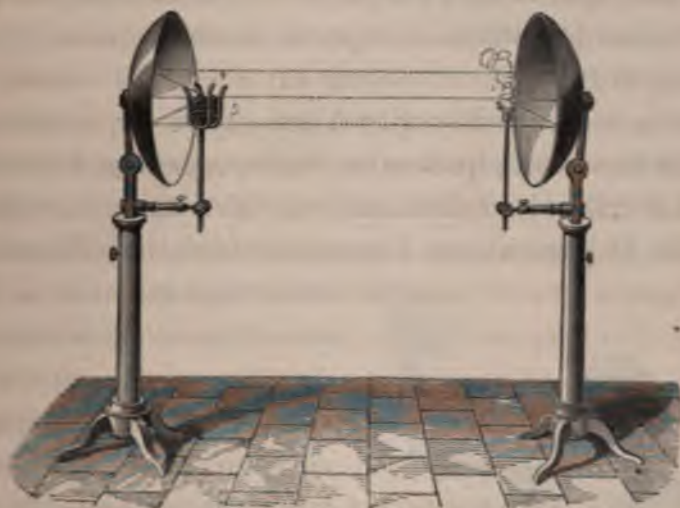


Fig. 306. — Réflexions de la chaleur; expériences des miroirs paraboliques conjugués.

coïncident (fig. 306), toute source de chaleur placée à l'un des foyers enverra au miroir correspondant des rayons qui se réfléchiront parallèlement à l'axe commun, et qui, en tombant sur le second miroir iront tous, après cette nouvelle réflexion, se réunir à son foyer. C'est ainsi que devront se passer les choses, si les lois de la réflexion de la chaleur sont les mêmes que celles de la lumière. Or, c'est en effet ce qui arrive. On place à l'un des foyers un panier en fil de fer renfermant des charbons incandescents, et à l'autre foyer de la poudre, de l'amadou, du fulmicoton, une substance inflammable en un mot. Celle-ci prend feu aussitôt. Enfin l'expérience ne réussit plus,

si l'on déplace tant soit peu la source de chaleur, ou le corps inflammable.

Une expérience de Davy a prouvé que les lois de la réflexion de la chaleur rayonnante sont les mêmes dans le vide que dans l'air. D'ailleurs, la chaleur obscure se conduit comme la chaleur qui rayonne des sources incandescentes : c'est ce que l'on a constaté en faisant l'expérience des miroirs conjugués avec un vase rempli d'eau bouillante. Ce vase occupant l'un des foyers, on met à l'autre foyer la boule d'un thermomètre, qui accuse aussitôt une élévation de température. Le même thermomètre placé hors du foyer ne manifeste aucun changement appréciable.

C'est le moment de parler d'une expérience curieuse qui pourrait faire croire qu'il existe un rayonnement frigorifique, comme il existe des radiations de chaleur. Si l'on substitue un morceau de glace à l'une des sources de chaleur dont il vient d'être question, et si on le place bien exactement au foyer d'un des miroirs, on voit aussitôt baisser le thermomètre de l'autre miroir, comme s'il y avait eu réflexion de froid. La vérité est qu'en ce cas, comme dans tous les autres, il y a en présence deux corps à des températures inégales, qui rayonnent tous les deux de la chaleur. Il en résulte pour chacun d'eux une perte de chaleur, en partie compensée par le gain qui résulte du rayonnement de l'autre. Dans la première expérience, le thermomètre recevait plus qu'il ne perdait, et il en résultait un accroissement de température, une élévation du



Fig. 307. — Miroir ardent.

niveau du mercure. Dans l'expérience faite avec le morceau de glace, c'est le thermomètre au contraire qui perd plus de chaleur qu'il n'en reçoit; sa température diminue, et le niveau thermométrique s'abaisse en effet.

On a utilisé les lois de la chaleur rayonnante, pour obtenir une chaleur d'une très-grande intensité au foyer d'un miroir sphérique concave exposé aux rayons solaires. Avec un appareil de ce genre, qu'on nomme alors un *miroir ardent* (fig. 307), et auquel on donne une grande ouverture et un rayon de courbure considérable, on a fondu des métaux, vitrifié de la brique, de la pierre, etc. Buffon a obtenu les effets des miroirs sphériques, en disposant 100 miroirs plans en verre étamé, de façon que chacun d'eux fût tangent à la même sphère. Chaque miroir pouvant tourner autour d'une charnière, il augmentait ou diminuait à volonté la distance du foyer. Il fondit ainsi du plomb à une distance de 140 pieds (45^m5), de l'argent à 100 pieds (32^m5).

§ III. RÉFRACTION DE LA CHALEUR.

Les rayons de chaleur qui tombent sur un corps ne sont pas tous réfléchis. Ils se partagent ordinairement en deux groupes; le premier est composé des rayons qui se réfléchissent à la surface du corps en suivant, comme on vient de le voir, les lois de la réflexion de la lumière, puis d'autres rayons qui sont envoyés diffusément dans tous les sens : ni les uns ni les autres ne pénètrent dans la substance du corps. Le second groupe est formé des rayons qui sont absorbés par cette substance, et qui déterminent une élévation de température en se propageant par conductibilité dans toute la masse : et enfin, de rayons qui traversent le corps et en sortent, de la même manière que la lumière traverse les milieux transparents. Les proportions de ces diverses fractions de la chaleur incidente varient beaucoup selon la nature du corps qui la

reçoit, l'état de sa surface, etc. De là, les expressions de *pou-voirs réflecteur*, *diffusif*, *absorbant* et *diathermane* pour dési-gner les propriétés qui correspondent à ces différents modes de radiation de la chaleur dans les divers corps. Nous en dirons quelques mots plus loin. Pour le moment, nous voulons seulement nous attacher au phénomène de la transmission de la chaleur rayonnante dans les milieux diathermanes, et aux lois de sa propagation, parce que nous allons y trouver une analogie de plus entre la chaleur et la lumière.

En effet, les rayons de chaleur qui entrent dans un milieu



Fig. 308. — Réfraction de la chaleur.

diathermane y subissent la déviation que nous avons étudiée à propos de la lumière, sous le nom de *réfraction*. Si le faisceau calorifique tombe perpendiculairement à la surface du milieu, la déviation est nulle. Mais, pour toute autre incidence, le faisceau est dévié : il se rapproche de la normale au point d'incidence, en passant d'un milieu dans un autre milieu d'une plus grande densité. En un mot, les lois de la réfraction de la chaleur s'énoncent comme celles de la réfraction de la lumière. C'est un fait qu'on démontre expérimentalement en se servant de lentilles sphériques convergentes, pour concen-trer les rayons calorifiques qui accompagnent les rayons lu-

mineux du soleil. On trouve que c'est au foyer, là où la lumière est la plus intense, que la chaleur est aussi la plus forte, et chacun peut vérifier l'exactitude de ce fait, en allumant à l'aide d'une loupe, une substance tant soit peu inflammable aux rayons du soleil : de l'amadou, du drap, du bois, du papier, etc. Il s'agit là, il est vrai, de sources de chaleur lumineuse : mais Melloni a démontré, en employant des prismes et des lentilles de sel gemme — cette substance est, de toutes, celle qui absorbe le moins de chaleur — que la chaleur obscure se réfracte de la même manière que celle provenant des sources incandescentes.

La réfraction de la chaleur a été utilisée, comme la réflexion, pour produire par la concentration des rayons calorifiques du soleil, une chaleur très-intense : on donne le nom de *verre ardent* à toute lentille construite dans ce but avec une substance diathermane quelconque. La puissance d'un verre ardent est d'autant plus considérable, que son ouverture est plus grande, et que les rayons des sphères auxquelles appartiennent les surfaces de la lentille ont une plus grande longueur. Tschirnhausen, célèbre par la construction de miroirs ardents d'une grande puissance, fit faire aussi des verres de près d'un mètre de diamètre, à l'aide desquels il parvint à fondre des métaux, à vitrifier des matières minérales. Buffon obtint les mêmes résultats avec une lentille à échelons : c'est un verre dont l'une des surfaces est plane, tandis que l'autre est taillée en couronnes concentriques. La courbure de chacune de ces couronnes est calculée de telle sorte que les rayons solaires tombant sur la surface viennent tous se concentrer en un même point (fig. 309). Dans un appareil de ce genre, l'épaisseur du verre étant beaucoup moindre que dans une lentille ordinaire de même ouverture, il y a moins de chaleur absorbée, et l'effet calorifique au foyer commun est plus intense.

On a imaginé aussi de construire des verres ardents avec divers liquides; la lentille était formée par deux verres con-

vexes laissant entre eux une cavité, et l'on remplissait celle-ci du liquide qu'on voulait employer. On cite dans ce genre, le verre ardent construit au siècle dernier par Bernières et Trudaine : il avait 4 pieds (1m33) de diamètre, et 8 pieds de rayon de courbure. En le remplissant d'essence de térébenthine et l'exposant aux rayons solaires, on obtint des effets calorifiques d'une intensité extraordinaire.



Fig. 309. — Lentille à échelons.

Toute le monde a entendu raconter que les marins, dans leurs voyages aux régions glacées des pôles, ont pu se servir de lentilles de glace pour se procurer du feu. En Angleterre, on a fait avec une lentille de glace d'un très-grand diamètre (3 mètres), des expériences très-intéressantes, qui ont prouvé la possibilité d'enflammer de la poudre, du papier, au foyer de cette lentille d'un nouveau genre.

On voit, par ce qui précède, que la chaleur rayonnante se propage suivant les mêmes lois que la lumière; sa vitesse est du même ordre de grandeur; sa direction est rectiligne dans les milieux homogènes; elle se réfléchit et se réfracte de la même manière. L'analogie est encore plus évidente, depuis qu'on sait que la chaleur éprouve la double réfraction dans les milieux biréfringents, et enfin, qu'elle se polarise aussi par réflexion, par réfraction simple et par double réfraction. Il est donc probable que les radiations calorifiques ne diffèrent pas essentiellement des radiations lumineuses, que les unes et les autres sont dues à la même cause, c'est-à-dire aux vibra-

tions de l'éther : seulement, tandis que l'ébranlement, causé par le mouvement des ondes lumineuses, affecte seul l'organe de la vue, celui qui provient des ondes calorifiques, au lieu de nous donner la sensation de la lumière, produit sur nos organes l'impression de la chaleur. On est même arrivé à considérer les radiations calorifiques et les radiations lumineuses, comme n'ayant entre elles d'autre différence que la plus ou moins grande rapidité du mouvement vibratoire qui leur donne naissance. Alors ce serait les ondulations les plus longues ou les rayons les moins réfrangibles — ces expressions sont équivalentes — qui constitueraient les rayons de chaleur, les radiations obcuress. A partir d'une certaine limite de rapidité, les vibrations, sans cesser de produire de la chaleur, impressionneraient la rétine et donneraient de la lumière.

Ces idées théoriques qui assignent une commune origine à des phénomènes en apparence si différents, et qui le sont en effet pour nos organes, tendent à prévaloir de plus en plus dans la science : les anciennes hypothèses qui faisaient de la chaleur, de la lumière, de l'électricité, du magnétisme, autant d'agents réels et distincts, ayant une existence propre, sont à peu près complétement abandonnées. Nous verrons bientôt, en ce qui concerne la chaleur, d'autres preuves qui témoignènt en faveur de la théorie nouvelle, en montrant que la chaleur se transforme en mouvement, et le mouvement en chaleur; transformation qui serait inexplicable dans l'hypothèse où le calorique serait une substance.

§ IV. MESURE DES POUVOIRS ÉMISSIF ET RÉFLECTEUR DES CORPS.

Tous les corps, quelle que soit leur température, émettent ou rayonnent de la chaleur. Nous avons décrit les expériences prouvant que cette émission a lieu pour la chaleur obscure, comme pour la chaleur lumineuse. Si donc deux ou plusieurs corps se trouvent en présence, ils rayonneront mutuellement

les uns vers les autres, et nous savons que la chaleur, reçue ainsi par chacun d'eux, sera en partie réfléchie ou diffusée, en partie transmise à travers sa substance, en partie enfin absorbée. C'est cette dernière partie seule de la chaleur tombée à la surface du corps qui, se propageant de molécule à molécule, ou par conductibilité, a une influence sur sa température.

Quand les corps en présence et renfermés dans une enceinte, sont à des températures inégales, l'expérience montre que les plus chauds se refroidissent peu à peu, tandis que les autres s'échauffent. Au bout d'un certain temps, l'équilibre de température s'établit, ce qui prouve, ou bien qu'à partir de ce moment, l'échange de chaleur cesse, ou bien que cet échange se fait avec une exacte compensation entre les pertes et les gains subis par chacun d'eux : les quantités de chaleur absorbée et de chaleur rayonnée sont alors égales entre elles. C'est cette dernière hypothèse qui est généralement admise : on l'exprime en disant que le *pouvoir absorbant* et le *pouvoir émissif* ou *rayonnant* d'un même corps sont égaux entre eux. Du reste, l'hypothèse a été vérifiée par l'expérience, pour des températures qui ne dépassent pas 300°.

La température d'une source de chaleur influe sur la rapidité plus ou moins grande avec laquelle elle se refroidit par le rayonnement. En général, plus cette température est élevée plus l'émission est considérable, toutes les autres circonstances restant les mêmes. Ce résultat se vérifie, que la source de chaleur soit enfermée dans un espace vide, ou dans une enceinte remplie d'un gaz, pourvu que sa température soit supérieure à celle des parois de l'enceinte, la vitesse du refroidissement étant d'ailleurs d'autant plus grande que l'excès de température est plus grand lui-même.

Le pouvoir émissif dépend aussi de la nature de la surface par laquelle s'effectue le rayonnement. Leslie a démontré cette inégalité du pouvoir émissif des différents corps de la manière suivante. Il prenait pour sources de chaleur des cubes creux,

dont les faces latérales étaient formées des substances dont il voulait comparer les pouvoirs émissifs, puis, il les remplissait d'eau bouillante, dont la température de 100° était entretenue par la chaleur d'une lampe à alcool. Chaque face du cube A était tournée successivement vers l'ouverture d'un miroir concave M, au foyer *a* duquel était placée l'une des boules de son thermomètre différentiel. Pour limiter le faisceau de chaleur qui tombait sur le miroir, Leslie plaçait deux écrans B, C, percés de larges ouvertures selon l'axe commun du miroir et du cube, ainsi que le montre la figure 310. L'action du faisceau

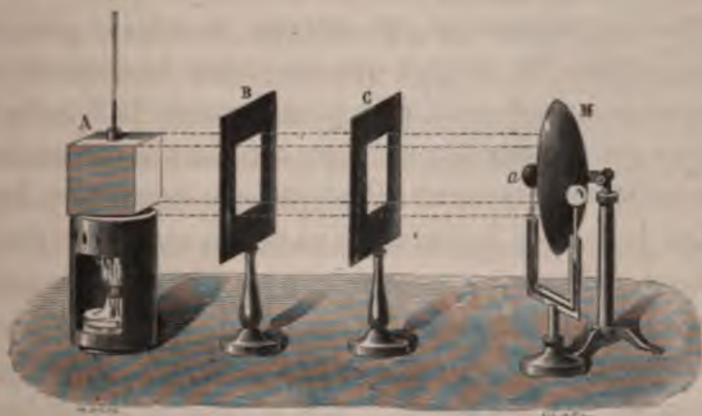


Fig. 310. — Mesure des pouvoirs émissifs des corps. Expérience du cube de Leslie.

rayonnant déterminait une différence de niveau dans les deux branches du thermomètre différentiel, qui devenait stationnaire au bout de quelques instants. En opérant de la même manière avec les diverses faces de ses cubes, Leslie prouva que la nature de la surface rayonnante influe considérablement sur le pouvoir émissif ; et, comme on démontre que les pouvoirs émissifs de deux corps sont proportionnels aux excès de température des deux boules de l'appareil, il put former un tableau comparatif de leurs valeurs, pour une même température des sources.

Depuis Leslie, on a mesuré de nouveau, à l'aide d'autres appareils, les pouvoirs rayonnants d'un grand nombre de corps,

et l'on a trouvé, comme lui, que le noir de fumée et le blanc de céruse sont les deux substances qui possèdent la plus grande intensité rayonnante. En représentant par 100 le pouvoir émissif de ces deux corps, on trouve pour les pouvoirs émissifs des substances suivantes, à la température de 100° :

Noir de fumée....	100	Acier.............	17
Blanc de céruse...	100	Platine...........	17
Papier...........	98	Laiton poli........	7
Verre............	90	Cuivre rouge......	7
Encre de chine....	85	Or poli...........	3
Gomme laque.....	72	Argent poli........	3

Ce sont les métaux qui ont, comme on voit, le plus faible pouvoir émissif. On croyait que les corps de couleur claire rayonnent moins que ceux de couleur sombre ou foncée. Mais le tableau qui précède dément cette opinion : la céruse dont la couleur est blanche rayonne autant que le noir de fumée. Le plus ou moins de poli de la surface d'un même corps, par exemple d'un métal, influe sur son pouvoir rayonnant : s'il s'agit d'une plaque écrouie ou laminée, en la rayant, on augmente son pouvoir; on le diminue, au contraire, si la plaque est de métal fondu, ce qui fait supposer que le pouvoir émissif est en raison inverse de la densité de la couche superficielle.

Les résultats qui précèdent rendent compte d'un fait que chacun peut vérifier aisément; c'est que les vases en métal poli, surtout les vases en argent, conservent longtemps la chaleur des liquides qu'ils contiennent; mais si leur surface est mate, et surtout si elle est recouverte de noir de fumée, le rayonnement devient, au contraire, très-intense, et le refroidissement du liquide qui s'y trouve contenu se fait avec rapidité.

Du pouvoir rayonnant des corps, passons à l'étude de leur *pouvoir réflecteur*.

Remarquons d'abord que, s'il s'agit d'un corps qui n'est pas transparent pour la chaleur, ou qui est *athermane*, sur 100 rayons de chaleur tombant à sa surface, un certain nombre 20,

je suppose, seront absorbés; tous les autres, au nombre de 80, seront réfléchis. Le *pouvoir absorbant* est donc *complémentaire* du pouvoir réflecteur. Or, comme le pouvoir absorbant est lui-même égal au pouvoir émissif, on pourrait trouver par un calcul fort simple, les pouvoirs réflecteurs des corps, sans recourir à l'expérience. Mais il ne faut pas oublier que c'est l'expérience elle-même qui a conduit au raisonnement qui précède, et, en physique, il est toujours plus instructif de procéder par la marche expérimentale, pour l'exposition des faits comme pour la vérification des lois.

Leslie a comparé les pouvoirs réflecteurs des diverses substances, en modifiant l'appareil qui lui avait servi pour les pouvoirs émissifs. Mais ici nous donnerons de préférence la description de l'appareil employé par Melloni, lequel permet d'ailleurs un grand nombre d'autres recherches sur la chaleur. Voici en quoi consiste cet appareil.

On réunit, en les soudant par leurs extrémités, une série de barreaux de deux métaux différents, de bismuth et d'antimoine par exemple, B, A,... et on les replie de façon à mettre toutes les soudures paires d'un côté et toutes les soudures impaires de l'autre, ainsi que le montre la figure 311. Les deux barreaux extrêmes de la série, l'un de bismuth, l'autre d'antimoine, étant reliés par un fil métallique, on a formé ce qu'on nomme une *pile thermo-électrique*. Toutes les fois qu'il existe entre les soudures paires et les soudures impaires une différence de température, un courant électrique circule soit dans un sens, soit dans l'autre, mais en marchant toujours du bismuth à l'antimoine par la soudure qui est à la température la plus élevée. On réunit ordinairement en un paquet, auquel on donne la forme d'un prisme rectangle, un certain nombre d'éléments semblables, de manière à mettre à découvert les deux



Fig. 311. — Éléments de la pile thermo-électrique.

faces, formées l'une par les soudures paires, l'autre par les soudures impaires.

Toutes les fois qu'on échauffera l'une ou l'autre des faces de la pile par une radiation calorifique, le courant sera engendré : il reste à dire comment son existence pourra être constatée. Les deux fils du circuit vont s'enrouler autour du cadre d'un galvanomètre, appareil dont on trouvera la description dans le livre V consacré à l'Électricité, et le courant agira sur l'aiguille

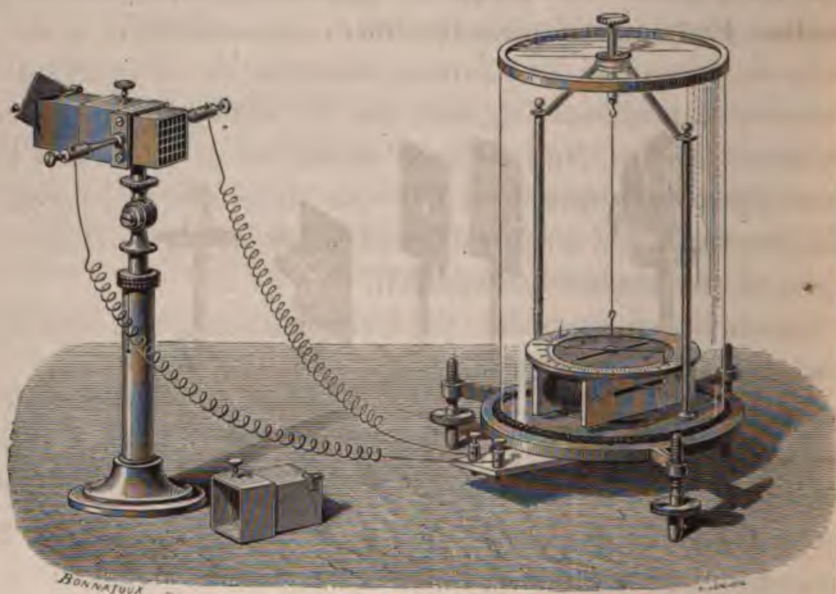


Fig. 312. — Pile thermo-électrique pour l'étude des phénomènes de la chaleur.

aimantée, en la déviant soit dans un sens soit dans l'autre suivant le sens du courant. On peut donc lire, sur le cadran du galvanomètre, la grandeur de la déviation, et juger ainsi de l'intensité du courant et, par suite, de la différence de température des deux faces de la pile.

La pile thermo-électrique, ainsi constituée (fig. 312), est un instrument d'une grande sensibilité : il suffit de toucher du doigt l'une des faces, ou d'y envoyer par insufflation une bouffée d'air chaud, pour que l'aiguille du galvanomètre soit fortement déviée. En touchant la même face avec un corps froid, la dé-

viation a lieu en sens contraire. Voyons maintenant comment Melloni s'est servi de la pile thermo-électrique pour mesurer le *pouvoir réflecteur* de différents corps.

En A (fig. 313) se trouve disposée un lampe dite de Locatelli, qui est une source calorifique d'intensité constante. B et C sont deux écrans, l'un entièrement opaque, l'autre percé d'une ouverture ou diaphragme, et laissant passer, quand l'écran B est abaissé, le faisceau de chaleur émané de la lampe. Sur le support D est placée une plaque de la substance réfléchissante à étudier. Enfin en E se trouve la pile thermo-électrique, mobile



Fig. 313. — Appareil employé par Melloni pour mesurer les pouvoirs réflecteurs des corps.

sur une règle HH'; cette règle peut elle-même se mouvoir autour du point H, de sorte qu'on peut placer les faces de la pile sur la direction du faisceau calorifique réfléchi. Avant de placer la plaque sur son support, on commence par faire tourner la règle autour du point H, et à l'amener dans le prolongement de la règle qui supporte les pièces ABC. On abaisse l'écran B, et l'on mesure la déviation de l'aiguille du galvanomètre, ce qui donne l'intensité d'un faisceau de chaleur rayonnant directement de la lampe sur la pile, à une distance égale à la somme des longueurs des règles. Cette première mesure effectuée, on en fait une seconde, qui donne l'intensité du faisceau réfléchi. Pour cela, on dispose les diverses

parties de l'appareil, comme elles sont dans la figure, la plaque réfléchissante étant sur son support, et la pile étant préservée du rayonnement direct par un large écran. En abaissant l'écran B, le faisceau émané de la source tombe sur la plaque, s'y réfléchit, et vient frapper la face de la pile après avoir parcouru la même distance que le faisceau direct dans la première opération. L'aiguille du galvanomètre est déviée d'une certaine quantité, et c'est le rapport des deux déviations qui donne le pouvoir réflecteur de la substance.

MM. La Provostaye et Desains, reprenant les recherches de Melloni, et opérant sur un grand nombre de corps, ont mesuré leurs pouvoirs réflecteurs sous diverses incidences, en faisant varier la nature de la source de chaleur. Ils ont reconnu que, pour un même corps, le pouvoir réfléchissant reste à peu près constant depuis l'incidence normale jusqu'à une incidence de 30°; ensuite il augmente avec rapidité, à mesure qu'augmente l'angle d'incidence. Le pouvoir réflecteur des métaux reste à peu près constant pour chacun d'eux, quelle que soit la manière dont leur surface a été travaillée, si d'ailleurs le degré de poli ne change pas. En représentant par 100 l'intensité du faisceau de chaleur incident, celle du faisceau réfléchi est donnée par les nombres suivants, qui sont relatifs à une incidence de 50° :

	Pouvoirs réflecteurs.	Pouvoirs rayonnants.
Argent poli........	97	3
Or..................	95	3
Cuivre rouge.........	93	7
Laiton poli..........	93	7
Platine..............	83	17
Acier...............	83	17
Verre...............	10	90
Noir de fumée.......	0	100

En comparant ces nombres à ceux qui mesurent les pouvoirs rayonnants ou émissifs des mêmes substances, reproduits dans la seconde colonne, on vérifie ce que nous avons dit plus haut, à savoir que les pouvoirs rayonnants et absorbants d'un même

corps doivent être égaux ; car le pouvoir rayonnant est complémentaire du pouvoir réflecteur, tout comme le pouvoir absorbant, du moins pour les corps qui ne laissent pas passer de chaleur rayonnante, et en faisant abstraction de la chaleur diffusée. Les métaux polis sont les corps qui sont doués du plus grand pouvoir réfléchissant ; quand leur surface est mate ou rayée, les rayons de chaleur sont renvoyés dans toutes les directions, et la proportion de la chaleur régulièrement réfléchie diminue considérablement, en même temps qu'augmente la proportion de chaleur diffuse. Il y a là un phénomène analogue à celui qu'on observe dans les mêmes circonstances pour les rayons de lumière.

Leslie et Melloni ont aussi comparé, à l'aide des deux appareils décrits plus haut, les *pouvoirs absorbants* des corps, c'est-à-dire la proportion de la chaleur émanée d'une source constante qui traverse leur surface et sert à élever leur température. Ils ont trouvé que, sous ce rapport, l'ordre de classification des diverses substances est le même que si on les range suivant leurs pouvoirs émissifs, résultat qui confirme, dans une certaine mesure, l'égalité de ces deux pouvoirs prévue par le raisonnement dans le cas de l'équilibre de température.

L'influence de la couleur sur l'absorption des radiations calorifiques avait été mise en évidence par des expériences de Franklin. Cet illustre physicien, posant sur la neige des morceaux d'étoffes de diverses couleurs, les laissa un certain temps exposés à la chaleur solaire. Ces fragments, en absorbant les rayons de chaleur, s'échauffèrent, fondirent la neige au-dessous d'eux, et s'enfoncèrent ainsi à des profondeurs diverses, d'autant plus grandes que leur couleur était plus foncée. On avait cru pouvoir conclure de ce résultat que les corps de couleurs claires sont les plus mauvais absorbants, et les corps de couleurs noires ou foncées les meilleurs absorbants, et cela justifiait une fois de plus l'identité supposée des

rayons de lumière et des rayons de chaleur. Mais Tyndall a fait voir récemment que cette conclusion n'est pas entièrement rigoureuse. Il faut, suivant ce physicien, tenir compte de la nature de la source de chaleur, les rayons de chaleur obscure ne se comportant pas de la même façon que les rayons de chaleur lumineuse. Il faut aussi mettre en ligne de compte le pouvoir diathermane des substances. C'est ainsi qu'ayant saupoudré deux cartes, l'une de poudre blanche d'alun, l'autre de poudre noire d'iode, et les ayant exposées au feu l'une et l'autre, il trouva que la carte iodée s'échauffait à peine, tandis que la carte alunée était devenue extrêmement chaude : il explique cette différence par la propriété diathermique que l'iode possède à un haut degré ; la chaleur rayonnante pénètre dans la poudre, se réfléchit sur les surfaces limites des molécules, sans être absorbée par elles. C'est ainsi encore qu'un fragment de phosphore amorphe, presque noir, placé au foyer de la lumière électrique, ne put s'enflammer, tandis que le même foyer portait presque instantanément le platine à la chaleur blanche. Tyndall attribue cet effet curieux à la diathermancie du phosphore.

§ V. MESURE DU POUVOIR DIATHERMANE.

Cette dernière propriété, que possèdent certaines substances, d'être traversées par les rayons de chaleur sans les absorber, ou, ce qui revient au même, sans que leur température en soit élevée, est la plus prononcée possible dans le sel gemme. Sur 1000 rayons qui arrivent à la surface d'une lame de cette substance, 923 sont transmis ; les 77 rayons qui ne passent point sont réfléchis sur les deux faces de la lame ; par conséquent, aucun d'eux n'est absorbé. Ce résultat remarquable, découvert par Melloni, reste le même, quelle que soit la nature des rayons de chaleur, qu'il s'agisse de chaleur lumineuse ou de chaleur obscure.

L'alun, le verre ne sont diathermanes que pour les radiations de chaleur lumineuse ; ils arrêtent les rayons de chaleur obscure : il en est de même du spath d'Islande, du cristal de roche, de la glace. L'épaisseur des lames a une influence sur l'absorption, comme sur la transmission des rayons de chaleur ; mais cette influence ne croît pas proportionnellement avec l'épaisseur. Ainsi sur 100 rayons qui arrivent sur deux lames diathermanes, dont l'une a une épaisseur double de l'autre, 62 rayons passent dans la plus mince, 58 dans l'autre : une



Fig. 314. — Appareil de Melloni pour la mesure du pouvoir diathermane des corps.

lame, dont l'épaisseur est quadruple de la première, laisse passer 55 rayons.

La comparaison des pouvoirs diathermanes des corps se fait à l'aide de l'appareil de Melloni, disposé comme le montre la figure 314. On voit en D, sur un support, la plaque de la substance dont il s'agit de mesurer le pouvoir diathermane. La pile thermo-électrique est disposée en E dans la direction du faisceau de chaleur qui traverse l'ouverture pratiquée dans l'écran C. On commence par mesurer la déviation de l'aiguille du galvanomètre, produite par le faisceau direct, sans interposition de la plaque. Puis, cette dernière étant placée sur son support, on note la déviation produite par le même faisceau traversant la plaque. Le rapport de ces deux déviations donne le pouvoir diathermane de la substance. Pour étudier l'influence de la

nature de la source, il suffit de substituer à la lampe de Locatelli d'autres sources de chaleur, par exemple, un cube d'eau bouillante, une plaque de cuivre noircie, une hélice de platine



Fig. 315. — Cube d'eau bouillante.

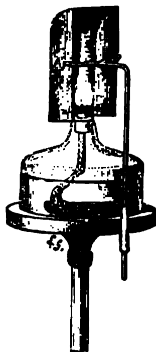


Fig. 316. — Plaque de cuivre noircie chauffée à 400°.

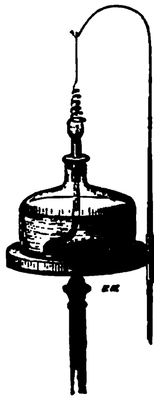


Fig. 317. — Hélice de platine incandescente.

incandescente : ces diverses sources calorifiques sont représentées dans les figures 315, 316 et 317. Dans les expériences qu'il fit à ce sujet, Melloni avait soin, pour rendre les résultats comparables, de placer ces diverses sources à des distances de la pile telles que le faisceau direct produisît sur l'aiguille du galvanomètre les mêmes déviations.

Voici quelques nombres, qui prouvent l'influence de la nature de la source de chaleur sur la transmission ou sur le pouvoir diathermane de diverses substances :

	Lampe de Locatelli	Cube d'eau à 100°	Cuivre à 400°	Platine incandescent
Rayonnement direct..	100	100	100	100
Sel gemme.........	92	92	92	92
Spath d'Islande......	39	28	6	0
Verre..............	39	24	6	0
Cristal de roche.....	37	28	6	0
Alun..............	9	2	0	0
Glace.............	6	0	0	0

On a conclu de ces expériences que, comme il y a divers rayons de lumière, il y a divers rayons de chaleur, que les corps

absorbent et transmettent en diverses proportions, à peu près de la même façon que les corps transparents absorbent de préférence, ou laissent passer, telles ou telles couleurs. C'est pour exprimer cette propriété, que Melloni a employé le mot de *thermochroïsme*, formé de deux mots dont le premier signifie *chaleur* et le second *coloration*.

Pour terminer ce que nous avons à dire de la chaleur rayonnante, énonçons la loi suivant laquelle décroît son intensité avec l'augmentation de la distance. Comme l'intensité de la lumière, *l'intensité de la chaleur rayonnante varie en raison inverse du carré de la distance.* Une expérience très-

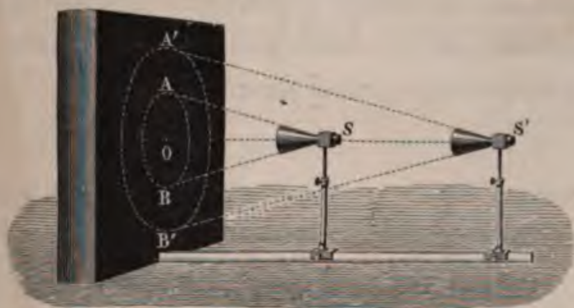


Fig. 318. — Intensité de la chaleur rayonnante. Loi du carré des distances.

simple que nous empruntons à *la Chaleur*, de Tyndall, va nous démontrer l'exactitude de cette loi, qu'on pourrait déduire, par le raisonnement, de l'hypothèse des radiations calorifiques.

On munit une face de la pile thermo-électrique, d'un cône qui limite les dimensions du faisceau de chaleur, et qui, recouvert intérieurement de papier noir, ne peut réfléchir la chaleur susceptible de tomber obliquement sur sa surface interne. Pour source de chaleur rayonnante, on emploie un vase de fer-blanc, dont l'une des faces est recouverte de noir de fumée et qu'on remplit d'eau bouillante : c'est cette face dont le rayonnement vers la pile va nous servir à vérifier la loi. On place la pile munie de son cône en face du vase, à une distance donnée SO (fig. 318) ; l'aiguille du galvanomètre est déviée d'une certaine quantité. On recule la pile à une dis-

tance double S'O; la position de l'aiguille du galvanomètre reste constante. Il en est de même enfin pour toute autre distance. Dans chacune de ces positions, l'effet total du rayonnement est donc le même; mais les parties de la surface du vase qui envoient des rayons de chaleur dans le cône sont de plus en plus grandes; ce sont des cercles dont les diamètres AB, A'B' croissent proportionnellement à la distance de la pile au vase, et dont les surfaces vont dès lors en croissant comme les carrés de ces distances mêmes. Il faut donc que l'intensité du rayonnement diminue en raison de ces mêmes carrés, pour que l'effet produit sur la pile reste constant. En un mot, l'augmentation de la surface rayonnante efficace est exactement compensée par la diminution de l'intensité avec la distance. La loi se trouve ainsi démontrée.

§ VI. PROPAGATION DE LA CHALEUR PAR CONDUCTIBILITÉ.

Nous avons vu que, si l'on tient à la main une barre de fer dont l'extrémité est plongée dans un foyer incandescent, la chaleur du foyer se communique au métal, et se propage de molécule à molécule tout le long de la barre; après un temps assez court, la température s'élève au point de brûler la main et de la forcer à lâcher prise. Si, au lieu d'être en fer, la barre, tout en conservant le même diamètre et la même longueur, était d'un autre métal, on observerait un effet analogue; mais on verrait varier à la fois, et le temps qu'un point situé à une même distance de l'extrémité chauffée sur chaque barre mettrait à s'élever à une certaine température, et la distance du point le plus éloigné de chacune d'elles susceptible d'acquérir une température déterminée. Voici une expérience fort simple qui mettra en évidence la différence que nous signalons :

Prenons deux barres de dimensions égales, l'une en cuiv[redacted]
l'autre en fer. Des billes de bois sont fixées avec de [redacted]e

à des distances égales des extrémités. Plaçons les barres bout à bout, et chauffons les extrémités contiguës, au-dessous du point de jonction, au moyen de la flamme d'une lampe à esprit de vin. Nous allons voir les billes tomber les unes après les autres, à mesure que la cire est fondue par la chaleur qui se propage par voie de conductibilité dans chaque barre. Mais au



Fig. 319. — Inégales conductibilité du cuivre et du fer.

bout d'un temps donné, nous trouverons que le nombre des billes tombées est en plus grand nombre du côté de la barre de cuivre que du côté du fer. D'autre part, deux billes de même rang, situées par conséquent à la même distance de la source, ne tombent pas au même instant. Laissons de côté pour le moment la rapidité avec laquelle la chaleur s'est pro-



Fig. 320. — Appareil d'Ingenhouz pour la mesures des pouvoirs conducteurs.

pagée le long de chaque barre, pour ne nous occuper que du premier effet, c'est-à-dire de la distance à laquelle un certain degré de température, qui est ici celui de la fusion de la cire, a pu être atteint sur les deux métaux. Le cuivre, pour lequel cette distance s'est trouvée plus grande, est dit *meilleur conducteur* de la chaleur que le fer.

La figure 320 représente un appareil, inventé par Ingenhouz et modifié par Gay-Lussac, et qui sert à comparer entre eux

les pouvoirs conducteurs des corps solides. Des baguettes cylindriques de chacune des substances à comparer, enduites de couches de cire ayant la même épaisseur, sont placées horizontalement, de manière à plonger par une de leurs extrémités dans un bain d'huile ou d'eau bouillante, l'autre extrémité traversant les parois de la caisse qui contient l'huile. La chaleur du liquide est conduite le long de chaque baguette, et fond la cire à des distances d'autant plus grandes, que la conductibilité de la substance dont elle est formée est elle-même plus considérable. On a imaginé d'autres procédés pour mesurer les pouvoirs conducteurs des solides ; mais celui que nous venons de décrire suffit pour faire comprendre comment on a pu ranger les différents corps dans l'ordre de leur conductibilité. Voici l'ordre dont il s'agit, pour les principaux métaux :

Argent.......	1000	Fer..........	119
Cuivre........	776	Acier.........	116
Or...........	532	Plomb	85
Laiton.... ...	236	Platine.......	84
Zinc	190	Palladium	63
tain	145	Bismuth......	18

Les métaux sont, de tous les corps solides, les meilleurs conducteurs de la chaleur, si l'on excepte toutefois le bismuth. La pierre, le verre, le marbre, le sont beaucoup moins que les métaux; enfin le bois, le charbon de bois préparé à une basse température, c'est-à-dire non calciné, et en général les substances organiques, les fruits charnus, les plantes grasses, les tissus des animaux et des végétaux, sont de mauvais conducteurs. On voit d'ailleurs, par les nombres qui précèdent, quelle différence existe entre les conductibilités des différents métaux. « On peut mettre cette différence en évidence, dit Tyndall, d'une manière très-simple, en plongeant par un bout deux cuillères, l'une de maillechort et l'autre d'argent, dans le même vase d'eau chaude. Après un peu de temps, on trouvera l'extrémité libre de la cuillère d'argent bien plus chaude que

celle de sa voisine; et si l'on place deux morceaux de phosphore sur les manches des deux cuillères, celui qui sera sur l'argent se fondra et s'enflammera dans un temps très-court, tandis que la chaleur transmise à travers l'autre cuillère n'arrivera jamais à une intensité suffisante pour enflammer le phosphore. » La raison de ces faits se trouve dans l'inégalité du pouvoir conducteur de l'argent et de celui du maillechort. Tandis que le premier est 1000, le second n'est que 60.

Un dernier fait va nous prouver que la conductibilité d'une substance ne dépend pas de la rapidité plus ou moins grande, avec laquelle la chaleur se propage à son intérieur. On prend deux courts cylindres de même volume, l'un de fer, l'autre de bismuth; et, après avoir enduit de cire blanche les bases des deux cylindres, on les place tous deux sur le couvercle d'un vase rempli d'eau chaude, les bases recouvertes de cire étant situées en haut. La chaleur du vase va se propager dans chaque cylindre, et la cire arrivera à fondre sur tous les deux; mais c'est sur le bismuth que la fusion commence d'abord. Cependant la conductibilité du bismuth, d'après notre précédent tableau, est 6 fois moindre que celle du fer. Quelle est donc la raison du phénomène constaté? C'est que, pour élever un même poids des deux métaux à la même température, il faut quatre fois plus de chaleur environ pour le fer que pour le bismuth. La chaleur reçue par le fer est donc en grande partie employée à élever sa température; et c'est ce qui explique la lenteur relative avec laquelle a lieu la propagation dans sa masse. Pour apprécier les pouvoirs conducteurs du fer et du bismuth, il faut, comme on l'a vu, prendre deux barres de même diamètre, mesurer les di-



Fig. 321. — Expérience sur la conductibilité du fer comparée à celle du bismuth.

stances à la source de chaleur des tranches qui ont la même température au moment de l'équilibre, et faire les carrés des nombres qui mesurent ces distances : ce sont ces carrés qui serviront de mesure aux deux pouvoirs conducteurs.

Dans tout ce que nous venons de dire, il s'agit de corps homogènes. Dans les solides dont la structure n'est pas identique dans tous les sens — tels sont par exemple les cristaux biréfringents, le spath, le quartz, etc. — la conductibilité varie suivant le sens de la propagation de la chaleur : il y a une complète analogie entre la manière dont la chaleur se propage dans ces corps, et celle relative au mouvement de la lumière. Ainsi, qu'on prenne deux plaques de quartz taillées, l'une parallèlement, l'autre perpendiculairement à l'axe optique, et qu'on les recouvre toutes deux de cire ; si, après les avoir percées d'un trou, on y fait passer un fil qu'on échauffe par un courant électrique, la cire se fond tout autour du point où la chaleur est appliquée. Mais tandis que la couche limitant la cire fondue est une ellipse dans la première plaque, c'est un cercle parfait dans la seconde (fig. 322), ce qui démontre l'inégale conductibilité dans les deux sens. La conductibilité du bois est maximum dans le sens de la direction des fibres ; elle est beaucoup moindre dans une direction perpendiculaire à la première.

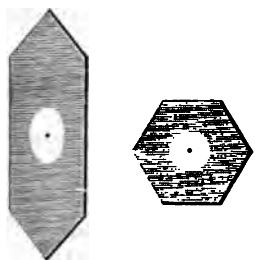


Fig. 322. — Inégale conductibilité du quartz dans des directions différentes.

L'inégale conductibilité des différents solides est utilisée dans une foule d'applications. Les outils et les ustensiles en métal, dont l'usage nécessite qu'on les soumette à une haute température, sont munis de manches mauvais conducteurs, en bois par exemple, qui arrêtent presque complétement la propagation de la chaleur. Les tissus de coton, de soie, surtout de laine, sont de fort mauvais conducteurs : ils sont donc très-propres à préserver le corps des excès de la chaleur et du froid. En été, ils empêchent la chaleur extérieure de pénétrer jusqu'à

la surface de notre corps; et en hiver, c'est au contraire la chaleur du corps qui reste emprisonnée, par la difficulté qu'opposent les vêtements à sa propagation au dehors. Du reste, ce n'est pas la substance seule dont ils sont composés qui donne aux tissus cette propriété précieuse ; c'est aussi leur structure : entre les filaments se trouvent interposées des couches d'air qui restent immobiles, et, comme les gaz en repos conduisent très-mal la chaleur, il en résulte que celle-ci passe avec une grande difficulté à travers le tissu. Un édredon conserve la chaleur à un très-haut degré, beaucoup mieux que ne ferait une couverture de laine serrée et plus pesante.

On pourrait multiplier à l'infini ces exemples. Bornons-nous à deux ou trois expériences curieuses fondées sur la différence de conductibilité des corps solides. On enveloppe une boule métallique d'une toile fine, qu'on maintient très-serrée contre le métal, de façon à ce que le contact soit bien établi. Puis, prenant avec une pince un charbon incandescent, on le pose sur la boule ainsi enveloppée. Le tissu reste intact : on a beau souffler sur le charbon pour augmenter son incandescence, la toile ne brûle pas. C'est que la chaleur reçue par la toile est immédiatement accaparée par le métal très-bon conducteur, et disséminée dans sa masse.

Qu'avant d'allumer un bec de gaz, on place au-dessus de l'orifice une toile métallique à tissu un peu serré, et qu'on ouvre le robinet, le gaz se répandra au-dessous et au-dessus de la toile. Si on l'allume au-dessous, la combustion reste limitée à la partie inférieure du jet de gaz ; si au contraire on l'allume au-dessus, c'est la partie supérieure du jet qui brûlera (fig. 323). Dans les deux cas, l'interposition de la toile métallique suffira pour limiter la combustion. La raison de ce fait est simple. Les mailles de la toile forment un excellent conducteur de la chaleur développée. Celle-ci se répand rapidement sur le tissu, sans pouvoir se propager du côté opposé à celui qui est en ignition. Nous verrons une importante application de cette propriété des toiles métalliques dans les

lampes de sûreté de Davy, employées par les mineurs. Le tissu métallique qui enveloppe la lumière suffit pour prévenir l'inflammation et l'explosion du grisou, ce gaz si dangereux qui se dégage dans les mines de houille.

L'asbeste et l'amiante sont deux substances minérales soyeuses, célèbres par leur incombustibilité : ce sont en effet des corps très-mauvais conducteurs de la chaleur, et l'on peut, avec un gant d'amiante, soutenir dans la main un boulet rouge sans être brûlé. Dans ce cas, la chaleur ne peut se propager : elle est interceptée ; dans l'exemple qui précède elle est, au contraire, absorbée rapidement ; dans les deux cas, sa propagation par voie de conductibilité se trouve limitée.



Fig. 323. — Propriété des toiles métalliques ; obstacle qu'elles opposent à la propagation de la chaleur.

Les expériences qu'on a faites pour mesurer la conductibilité des liquides et des gaz prouvent que cette conductibilité est très-faible. Cependant, on voit la chaleur se propager avec assez de rapidité dans ces deux sortes de milieux. Mais alors ce n'est plus par conductibilité, c'est par convection, c'est-à-dire par transport des parties échauffées. La raison de ces mouvements est aisée à comprendre. Quand une portion de liquide est chauffée, sa densité diminue ; dès lors, en vertu du principe d'Archimède, cette portion tend à s'élever et à remplacer les couches plus denses qui la surmontent. C'est ce qui arrive, quand on chauffe un liquide par le fond du vase qui le contient. Si le liquide est chauffé latéralement, les courants qui s'établissent partent seulement des parois, au

lieu de partir de tous les points du fond. L'échauffement, dans ce cas, est beaucoup moins rapide. Du reste, l'existence des courants dont il s'agit est facile à mettre en évidence. On n'a qu'à mêler au liquide des poudres de même densité que lui, par exemple de la sciure de bois dans l'eau. Cette poudre reste en suspension, et dès qu'on chauffe le vase, on voit le mouvement des particules, de haut en bas et de bas en haut, accuser l'existence des courants : les courants ascendants proviennent des parties échauffées qui s'élèvent, les courants descendants sont dus aux parties froides plus denses qui remplacent les premières. La chaleur est donc charriée dans toute la masse du liquide, et c'est ainsi qu'elle se propage.

Toutefois la conductibilité des liquides n'est pas nulle, comme l'a prouvé M. Despretz en chauffant par la base supérieure un vase cylindrique rempli du liquide à étudier. Douze thermomètres dont les boules étaient engagées à diverses hauteurs dans le liquide, et dont les tiges étaient extérieures au vase, indiquèrent des températures décroissantes depuis les couches supérieures jusqu'à la moitié du vase, qui avait un mètre de hauteur. Les six thermomètres inférieurs ne montèrent pas d'une manière sensible. La conductibilité des liquides est ainsi prouvée, mais elle est très-faible.

Celle des gaz n'a pu être constatée. Tout ce qu'on sait, c'est qu'ils sont certainement de très-mauvais conducteurs de la chaleur. Les masses gazeuses s'échauffent, comme les masses liquides, par transport ou convection : grâce à leur grande dilatabilité, dès qu'une portion de masse gazeuse se trouve échauffée, soit par rayonnement, soit par contact, son volume s'accroît, et il en résulte des mouvements qui mélangent les diverses couches. La chaleur se trouve ainsi charriée comme dans les liquides, mais avec une rapidité encore plus grande. Aussi, dès qu'on gêne les mouvements dont nous parlons, en emprisonnant le gaz dans les interstices que laissent entre leurs fragments des substances filamenteuses comme le coton, la laine, la soie non tissée, le duvet, etc., le gaz s'échauffe diffici-

lement, ainsi qu'il résulte d'un grand nombre d'expériences dues à Thomson. Nous avons vu plus haut que c'est en partie grâce à cette propriété des gaz, de conduire très-mal la chaleur quand ils sont en repos, que les vêtements préservent le corps des pertes de chaleur pendant les temps froids.

CHAPITRE III.

CALORIMÉTRIE.

§ I. CHALEURS SPÉCIFIQUES DES CORPS.

Quand un corps s'échauffe ou se refroidit d'un certain nombre de degrés, nous disons qu'il gagne ou qu'il perd une certaine quantité de chaleur; mais le thermomètre, qui nous renseigne sur ces variations, ne nous indique rien sur la valeur de cette quantité : il ne faut donc pas prendre à la lettre le sens que l'on pourrait tirer de l'étymologie. Le thermomètre mesure les températures, il ne mesure pas les quantités de chaleur. Nous allons voir, en effet, que la chaleur nécessaire pour élever un poids donné d'un corps d'un certain nombre de degrés varie avec la nature et l'état physique du corps; au delà de certaines limites de température, elle varie même pour une même substance.

Mais avant d'aller plus loin, il faut préciser ce qu'on peut entendre par quantité de chaleur. Nous ne savons rien sur la nature intime de la chaleur; les analogies que nous avons essayé de faire ressortir entre la chaleur rayonnante et la lumière ont bien conduit les physiciens à admettre que les phénomènes calorifiques sont, comme les phénomènes lumineux, déterminés par des vibrations de l'éther; mais comment ces vibrations, en pénétrant à l'intérieur des corps, produisent-elles des changements de volume et des changements d'état, c'est là une question que la science ne peut résoudre encore, et à laquelle on n'a répondu que par des conjectures. Toute-

fois, des recherches d'une haute importance ont mis hors de doute ce fait capital, que la chaleur peut être engendrée par des procédés mécaniques, et réciproquement se transformer en mouvements visibles susceptibles d'une évaluation précise : en un mot, la chaleur peut être assimilée à une force, et mesurée comme les autres forces physiques. Nous essayerons plus loin de donner une idée de ce qu'on entend par l'*équivalent mécanique de la chaleur*.

Mais sans sortir du domaine de la chaleur elle-même, nous allons dire comment on a pu comparer entre elles les quantités de chaleur qui sont absorbées ou dégagées dans les variations de la température, ainsi que dans les changements d'état des corps solides, liquides et gazeux. On donne le nom de *calorimétrie* à cette partie de la science de la chaleur.

L'unité de chaleur ou *calorie* est la quantité de chaleur nécessaire, pour élever de 0° à 1° centigrade un poids d'eau de 1 kilogramme. On regarde comme évident que, s'il faut un nombre déterminé de calories pour élever la température de l'unité de poids d'un corps d'un certain nombre de degrés, il en faudrait 2, 3, 4.... fois plus, pour élever du même nombre de degrés la température d'un poids 2, 3, 4 fois plus grand. En un mot, les quantités de chaleur sont proportionnelles aux poids. On regarde aussi comme évident, que la chaleur absorbée par un poids donné d'un corps pour élever sa température d'un certain nombre de degrés, est égale à celle qu'il dégage en revenant à sa température primitive. Une expérience très-simple va nous prouver en outre que la quantité de chaleur absorbée par une certaine élévation de température est sensiblement constante, quelle que soit la température initiale. Dans un vase qu'on a chauffé à la température de 25°, on verse 1 kilogramme d'eau à 0°, et 1 kilogramme d'eau à 50° : puis, après avoir remué rapidement le mélange, on y plonge un thermomètre. On trouve que la température du mélange est de 25°. Ainsi la chaleur, cédée par le kilo-

gramme d'eau à 50° au kilogramme à 0°, a suffi pour élever de 25° la température du second; en même temps cette perte de chaleur subie par le premier a abaissé de 50° à 25° sa température. En définitive, cette expérience prouve que la chaleur nécessaire pour élever de 0° à 25° un poids d'eau déterminé élèverait de 25° à 50° le même poids d'eau. La température initiale n'a donc pas d'influence sur la quantité de chaleur absorbée.

Mais cela n'est vrai que dans certaines limites, qui varient avec les différents corps. Ainsi deux kilogrammes de mercure, l'un à 200°, l'autre à 0°, mélangés ensemble, donnent deux kilogrammes de mercure, non plus à 100 température moyenne entre les deux extrêmes, mais bien à 102°,85 température supérieure à cette moyenne. Au delà de 100°, le mercure absorbe ou dégage plus de chaleur, pour une même variation de température, qu'au-dessous de 100°.

Enfin, une troisième expérience montre que les quantités de chaleur que nous venons de comparer varient avec la nature des substances. Mélangeons séparément 1 kil. d'eau à 0° avec un même poids de mercure ou d'essence de térébenthine, à 100°, ou encore plongeons-y un kilogramme de cuivre à 100°. Il y aura, comme précédemment, gain de chaleur pour l'eau, perte pour les autres substances, et dans chaque expérience il est bien évident que le gain sera égal à la perte. Mais dans le premier cas, la température du mélange sera 3°,2; dans le second, 30°; dans le troisième cas enfin, 8°,6. On voit donc de combien il s'en faut que des quantités de chaleur égales produisent la même variation de température, sur des poids égaux de substances différentes. C'est ce qu'on exprime, en disant que chaque substance a une *capacité calorifique*, ou une *chaleur spécifique*, qui lui est propre: et l'on définit la *chaleur spécifique* la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 0° à 1°, la température d'un kilogramme du corps. Cette quantité de chaleur s'exprime en *calories*, ce

qui revient évidemment à prendre pour unité la chaleur spécifique de l'eau.

Diverses méthodes ont été employées par les physiciens pour mesurer les chaleurs spécifiques des corps solides. L'une, la méthode des mélanges, consiste à plonger le corps, dont la température est connue, dans un bain d'eau ou d'un autre liquide à une température également déterminée : quand la température du mélange est devenue stationnaire, on la mesure, et par un calcul très-simple[1], on obtient le rapport des chaleurs spécifiques du solide et du liquide. Cette méthode s'applique également aux liquides. On prend des précautions particulières, quand les corps mis en contact exercent l'un sur l'autre une action chimique. En outre, on tient compte de la chaleur absorbée par le vase, par le thermomètre lui-même, et enfin des pertes causées par le rayonnement.

Voici un tableau donnant les chaleurs spécifiques de différents corps solides, liquides et gazeux. Il montre que l'eau est, de toutes les substances (l'hydrogène excepté, dont la chaleur spécifique est plus de trois fois celle de l'eau), celle qui absorbe ou qui dégage la plus grande quantité de chaleur pour des variations égales de température :

Substances.	Chaleurs spécifiques.
Eau	1,000
Hydrogène	3,294
Essence de térébenthine	0,426
Air	0,207
Soufre	0,203
Verre	0,198
Fer	0,114

1. Ce calcul consiste à résoudre une équation, dont le premier membre exprime la quantité de chaleur perdue par le corps, et par conséquent cédée au bain et au vase; le second membre de l'équation comprend deux termes exprimant, l'un, la chaleur gagnée par le liquide, l'autre, la chaleur gagnée par le vase qui le renferme. Il est évident, qu'en négligeant le rayonnement extérieur du liquide et du vase, la perte et les gains dont nous parlons se compensent: d'où l'équation et la solution du problème.

Cuivre	0,095
Argent	0,057
Étain	0,056
Mercure	0,033
Or	0,032
Platine	0,032
Plomb	0,031
Bismuth	0,031

Mais il ne faut pas oublier que ces nombres représentent les quantités de chaleur nécessaires pour élever des poids égaux de ces corps de 0° à 1°, et qu'ils ne restent constants qu'entre certaines limites de température. Ils varient peu de 0° à 100°; il n'en est plus de même au-dessus de cette dernière température. La chaleur spécifique du mercure, par exemple, qui est 0,033 entre ces limites, s'accroît au delà de 100° et devient 0,035. L'état physique fait aussi varier la chaleur. spécifique d'un même corps : à l'état solide, elle est moindre qu'à l'état liquide, et à l'état gazeux, elle reprend sensiblement la valeur qu'elle avait à l'état solide; la capacité de la glace, à peu près égale à celle de la vapeur d'eau, n'est guère que moitié de celle de l'eau. Quand on augmente la densité d'un métal, par exemple en l'écrouissant, sa chaleur spécifique diminue. Cela explique dans une certaine mesure le fait qui ressort du tableau précédent, à savoir que les corps les plus denses ont, en général, la capacité calorifique la plus faible.

Dulong et Petit ont découvert une loi remarquable, qui a été vérifiée par M. Regnault, dans ses belles expériences sur les chaleurs spécifiques des corps. Voici en quoi consiste cette loi. On sait que les chimistes ont été amenés à considérer les corps simples comme formés de parties irréductibles ou d'atomes, dont le poids est ce qu'ils nomment l'équivalent chimique du corps. Le poids de l'atome d'hydrogène étant pris pour unité, celui d'un atome de mercure est 100, celui d'un atome de soufre est 16, etc. Cela posé, demandons-nous quelle quantité de chaleur sera nécessaire à un atome de soufre pour élever sa température d'un degré, quelle quantité de chaleur

sera pareillement absorbée par un atome de mercure pour élever sa température aussi d'un degré. Évidemment, d'après ce qui précède, il faudra multiplier les poids 100 et 16 de chaque atome par la chaleur spécifique du corps simple auquel il appartient, c'est-à-dire par 0,033 et 0,203 : les produits seront proportionnels aux quantités de chaleur cherchées. Or, $100 \times 0,033$ donne 3,3 et $16 \times 0,203$ donne 3,248. Les produits sont sensiblement égaux, et il en serait de même, si nous avions pris deux autres corps simples quelconques. On peut donc énoncer, de la façon suivante, la loi dont il s'agit :

Il faut la même quantité de chaleur pour élever d'un même nombre de degrés la température de l'atome d'un corps simple quelconque ; ou encore, la *chaleur spécifique atomique* est la même pour toutes les substances.

Nous avons vu que la chaleur spécifique de l'eau est à peu près quatre fois plus grande que celle de l'air. Il suit de là qu'un poids d'eau de mille kilogrammes, en se refroidissant de 1 degré, dégage une quantité de chaleur suffisante pour élever aussi de 1 degré un poids de 4000 kilogrammes d'air. Mais 4000 kilogrammes d'air occupent, sous la pression barométrique normale et à 0°, un volume qui est 770 fois celui d'un même poids d'eau, c'est-à-dire égal à 3080 mètres cubes. Les conséquences de ce fait sont exprimées de la façon suivante par Tyndall, dans son ouvrage sur la *Chaleur :* « La grande influence que l'Océan doit exercer comme modérateur du climat, se présente ici d'elle-même. La chaleur de l'été est emmagasinée dans l'océan, et lentement abandonnée pendant l'hiver. C'est là un obstacle aux températures extrêmes pour le climat des îles. Les étés des îles ne peuvent jamais atteindre la chaleur brûlante de l'été des continents, et l'hiver des îles ne peut jamais être aussi rigoureux que l'hiver des continents. Sur divers points du continent d'Europe, on cueille des fruits que nos étés (ceux d'Angleterre) ne peuvent pas mûrir ; mais

aussi, nos arbres toujours verts y sont inconnus; ils ne peuvent pas y vivre pendant les hivers. L'hiver de l'Irlande est, en règle générale, plus doux que l'hiver de la Lombardie. » Toutefois, en citant ces remarques, qui nous paraissent justes, n'oublions pas que les faits particuliers, cités par Tyndall, ne dépendent pas seulement du voisinage de l'Océan et de la haute chaleur spécifique de l'eau, mais aussi de l'élévation de la température dans ces régions, par le grand courant d'eau tiède, connu sous le nom de Gulf-Stream.

Quand nous avons décrit les phénomènes de fusion des solides, de vaporisation des liquides, nous avons insisté sur ce fait général, que la température du point de fusion et celle du point d'ébullition sont des températures fixes pour chaque corps, ne dépendant pas de l'intensité du foyer de chaleur qui les détermine, ou de la rapidité avec laquelle ces changements d'état s'effectuent. Ces températures sont les mêmes d'ailleurs que celles des phénomènes inverses de solidification des liquides et de liquéfaction des vapeurs.

Ainsi, quand un morceau de glace fond, sa température reste constamment égale à 0°, et toute la chaleur fournie par le foyer, quelle qu'en soit l'intensité, est employée à réduire la glace à l'état liquide et à maintenir cet état. Voilà donc une quantité de chaleur absorbée par un corps, sans élever sa température, sans, par conséquent, devenir sensible au thermomètre. C'est pour cette raison qu'on la nomme *chaleur latente*. C'est la chaleur latente de fusion ou de *liquidité*, ou bien la chaleur latente d'*élasticité*, selon qu'il s'agit du passage de l'état solide à l'état liquide ou bien du passage de l'état liquide à l'état gazeux. Il est bien clair que cette chaleur, qui est absorbée dans ces deux cas, est au contraire dégagée, quand a lieu le retour du corps à son état primitif. On a mesuré la chaleur latente des diverses substances par des méthodes analogues à celles qui ont servi à déterminer leurs chaleurs spécifiques. Nous nous bornerons ici à donner le résultat obtenu

pour la fusion de la glace, parce qu'il nous permettra de décrire un autre procédé de détermination de la chaleur spécifique des corps.

On a trouvé que la chaleur latente de fusion de la glace est de 79,25 calories, c'est-à-dire que la quantité de chaleur, absorbée par un kilogramme de glace pour se fondre, suffirait à élever à la température de 1°, 79 k. 25 d'eau à 0°, ou bien, ce qui revient au même, à élever de 0° à 79° 25 un kilogramme d'eau. En un mot, quand on fait fondre un kilogramme de glace à 0° dans un kilogramme d'eau à 79°,25, les deux kilogrammes d'eau qui résultent de la fusion sont tous deux à la température de 0°. La connaissance de ce résultat permettra donc de mesurer la chaleur spécifique d'un corps, en cherchant par l'expérience le poids de glace qu'il est susceptible de fondre en abaissant sa propre température à 0°. Voici comment on procède :

Dans un bloc de glace bien compacte et bien homogène, on creuse une cavité, dont on essuie avec soin les parois. On y introduit alors le morceau de la substance dont il s'agit de trouver la chaleur spécifique, et dont la température, supérieure à 0°, est connue ; puis, on pose sur la face bien plane du bloc, une plaque épaisse de glace qui sert de couvercle (fig. 324). En se refroidissant, le corps fond une portion de la glace avec laquelle il se trouve en contact ; on recueille l'eau de fusion, et on la pèse. Supposons qu'on trouve pour résultat 100 grammes : il est clair que la chaleur dégagée par le corps, pour s'abaisser à 0°, a été la dixième partie de 79,25 calories, ou 7,925 calories. Par hypothèse, le corps pesait 2 kilogrammes, et était d'abord à la température de 35°. En divisant 7,925 par 35, puis par 2, on trouvera la quantité de chaleur dégagée par 1 kilogramme pour une variation de 1°, c'est-à-dire la chaleur spécifique du corps. Dans le cas par-

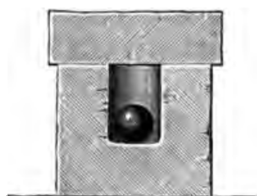


Fig. 324. — Mesure de la chaleur spécifique des corps. Méthode du puits de glace.

ticulier que nous venons de choisir, on trouverait 0,113 : c'est la chaleur spécifique du fer.

Au lieu du *puits de glace*, on emploie de préférence le *calorimètre de glace* imaginé par Laplace et Lavoisier, et que la figure 325 représente en coupe et en élévation. C'est un appareil formé de trois vases qui s'enveloppent mutuellement, et entre lesquels on place des fragments de glace et de la



Fig. 325. — Mesure des chaleurs spécifiques des corps. Calorimètre de glace de Laplace et Lavoisier.

glace pilée. Le corps chaud se place à l'intérieur du plus petit vase ; en se refroidissant, il fond une certaine quantité de glace, et l'on recueille l'eau de fusion par un robinet situé au-dessous du vase. La glace située entre les deux vases extérieurs empêche la fusion, par la chaleur extérieure, de celle qui est en contact avec le corps chaud.

Ces méthodes ne donnent pas des résultats bien précis ; si nous les avons exposées de préférence aux méthodes plus

perfectionnées, c'est que notre but est principalement de faire comprendre la possibilité de l'évaluation des quantités de chaleur. Les lecteurs qui voudront pousser plus loin cette étude auront recours aux ouvrages spéciaux, parmi lesquels il faut citer les beaux Mémoires de M. Regnault sur les chaleurs spécifiques des vapeurs et des gaz.

Pour se réduire en vapeur, à la température de l'ébullition ou de 100°, un kilogramme d'eau exige 536 calories. Que la vapeur ainsi formée se condense et revienne à l'état liquide, elle dégagera la même quantité de chaleur. C'est sur ce fait qu'est basée l'application de la vapeur au chauffage des édifices. On emploie aussi, dans l'industrie, la chaleur latente de la vapeur d'eau pour élever la température de masses liquides considérables.

§ II. LES SOURCES DE CHALEUR. — CHALEUR SOLAIRE.

Il résulte de l'étude que nous venons de faire des phénomènes calorifiques, que deux ou plusieurs corps mis en présence font un échange mutuel et continu de chaleur, soit par rayonnement et à distance, soit par conductibilité. Il se peut que, par le fait de cet échange, il y ait équilibre de température ; mais quand il n'en est pas ainsi, quand la température d'un corps s'élève aux dépens de la chaleur qu'un autre corps lui envoie, ce dernier corps est pour le premier une source de chaleur. A ce point de vue, un morceau de glace à 0° est une *source de chaleur* pour un corps qui est à une température inférieure à la sienne.

Cependant, dans l'acception vulgaire, cette expression de source de chaleur est plus particulièrement réservée aux corps doués d'une haute température, qui émettent d'une façon continue, pour un temps limité ou même en apparence indéfini, une certaine quantité de chaleur. Les solides et les gaz incandescents, ce qu'on nomme le feu, la flamme, sont des

sources de chaleur de cet ordre : on peut aussi ranger dans la même catégorie les corps qui émettent de la chaleur obscure à une température élevée, par exemple de l'eau en ébullition.

Enfin, on donne aussi le nom de source de chaleur aux divers modes de production de la chaleur : dans ce sens, le frottement, la percussion, l'électricité, la combustion, c'est-à-dire certaines actions physiques ou chimiques, sont des sources de chaleur. La chaleur qu'émettent les corps organisés et vivants est du même ordre.

On classe quelquefois les sources de chaleur en temporaires et accidentelles, en naturelles et artificielles, en cosmiques et terrestres; mais ces distinctions, n'étant pas basées sur la nature même des choses, ne nous apprendraient rien de plus que l'étude particulière de chaque espèce de source. Bornons-nous donc à les passer en revue les unes après les autres, en commençant par la plus importante de toutes, au moins pour la Terre, par le Soleil.

Cet astre est composé d'un noyau incandescent, entouré d'une atmosphère gazeuse absorbante, ainsi que le prouve l'analyse du spectre solaire. Quant au noyau, les opinions des savants sur sa nature sont partagées : les uns le considèrent comme un solide ou un liquide incandescent, d'autres comme une masse gazeuse pareillement incandescente. On ne sait pas davantage comment se renouvelle et s'entretient l'immense provision de lumière et de chaleur, qu'il rayonne tout autour de lui dans l'espace, et dont l'intensité ne paraît pas avoir sensiblement varié depuis des milliers d'années.

Mais l'intensité de la chaleur solaire, telle qu'elle nous parvient à la surface du globe terrestre, a été mesurée par sir John Herschel au cap de Bonne-Espérance, et par M. Pouillet à Paris. L'instrument dont ce dernier savant s'est servi pour cette mesure, et qu'il nomme *pyrhéliomètre*, est représenté dans la figure 326. On voit, à la partie supérieure, un vase cylindrique en argent très-mince, dont la face tournée au Soleil est

recouverte de noir de fumée. Ce vase est rempli d'eau, et la température du liquide est indiquée par un thermomètre dont la boule vient plonger à l'intérieur du cylindre, et dont la tige est protégée par un tube en laiton percé longitudinalement d'une rainure, de manière à laisser voir le niveau du mercure. A l'autre extrémité du tube, un disque, de même diamètre que le vase cylindrique, reçoit l'ombre de ce dernier, et permet de



Fig. 326. — Pyrhéliomètre de M. Pouillet

vérifier si la surface noircie est exposée normalement à la direction des rayons du Soleil : c'est ce qui arrive quand le disque inférieur est exactement recouvert par l'ombre circulaire du disque supérieur.

On commence par noter la température de l'instrument ; puis, on expose sa face noircie vers une portion du ciel sans nuages, mais de manière que cette face ne reçoive pas les rayons solaires. Au bout de cinq minutes, le rayonnement

détermine un certain abaissement de température. En dirigeant alors l'instrument vers le Soleil, la face noircie reçoit pendant cinq autres minutes la chaleur solaire tombant perpendiculairement sur elle. On note l'élévation de température. Enfin, on fait de nouveau rayonner l'instrument pendant cinq minutes dans sa première position, et l'on observe encore le refroidissement final. La première et la troisième observation sont nécessaires pour calculer la quantité de chaleur perdue par le rayonnement de l'instrument dans l'espace, pendant son exposition au Soleil, quantité qui est une moyenne entre les deux refroidissements observés. En l'ajoutant à l'échauffement dû à l'exposition directe aux rayons solaires, on aura l'élévation de température totale; et par suite on pourra calculer le nombre de calories absorbées pendant une minute par une surface égale à celle du disque noirci.

Cette quantité de chaleur dépend, comme on le pense bien, de l'élévation du Soleil au-dessus de l'horizon; car, avant de parvenir à la surface de la Terre, les rayons calorifiques du Soleil ont à traverser des couches atmosphériques, qui en absorbent une proportion d'autant plus considérable que leur épaisseur est plus grande. M. Pouillet a cherché la loi que suit l'intensité calorifique du Soleil, à mesure que varie la hauteur de l'astre, et il en a conclu l'absorption due à l'atmosphère pour le cas où le Soleil serait au zénith. Cette absorption varie d'ailleurs dans certaines limites, suivant la pureté de l'atmosphère, et peut s'élever à 0,25, c'est-à-dire au quart de la chaleur qui parviendrait au sol, si l'atmosphère n'existait pas.

En considérant la chaleur totale reçue par un hémisphère entier, et par conséquent sous toutes les obliquités possibles, on trouve que la proportion absorbée par l'atmosphère est comprise entre les quatre dixièmes et les cinq dixièmes de la chaleur qu'enverrait le Soleil, si le ciel était partout sans nuages. Le sol terrestre ne reçoit donc guère que la moitié de la chaleur solaire, moitié qui se distribue inégalement suivant l'obliquité des rayons; l'autre moitié échauffe l'atmosphère.

Supposant la chaleur reçue par la Terre uniformément répartie, M. Pouillet a calculé qu'un centimètre carré reçoit par minute 0.441 calories, c'est-à-dire une quantité de chaleur suffisante pour élever d'un degré la température de 441 grammes d'eau. En une année, chaque centimètre carré reçoit 231 675 calories : la quantité de chaleur, reçue en une année par la Terre entière, serait suffisante pour fondre une couche de glace de 31 mètres d'épaisseur enveloppant tout le globe.

De la quantité de chaleur reçue annuellement par la Terre, on peut déduire la chaleur totale rayonnée par le Soleil dans l'espace. Il suffit, pour cela, de calculer combien la surface d'un grand cercle terrestre est contenue de fois dans la surface d'une sphère qui aurait le centre du Soleil pour centre et pour rayon la distance de cet astre à notre globe. Un calcul facile donne pour résultat 2 150 000 000, de sorte que la chaleur interceptée par la Terre n'est que la 2 150 000 000me partie du rayonnement solaire tout entier. « Si la chaleur émise par le Soleil, dit Tyndall, était employée à fondre une couche de glace déposée à sa surface, en une heure elle liquéfierait une épaisseur de 732 mètres. Dans le même temps, elle élèverait à la température de l'ébullition 2 900 000 000 myriamètres cubes d'eau à 0°. Exprimée sous une autre forme, la chaleur émise par le Soleil en une heure est égale à celle qu'engendrerait la combustion d'une couche de houille de trois mètres d'épaisseur, enveloppant le Soleil; enfin, la chaleur solaire émise en un an équivaut à celle que produirait la combustion d'une couche de houille de 27 kilomètres d'épaisseur. »

Telle est l'intensité calorifique de l'immense foyer qui fournit à la Terre et aux autres planètes leur provision de chaleur, et, comme nous le verrons, ce qui revient au même, leur provision de vie et de force mécanique. Quant à dire comment cette prodigieuse activité calorifique est entretenue, c'est ce qu'on ne sait encore : on a fait sur ce point des hypothèses très-ingénieuses, mais qui ne reposent que sur des conjectures.

La Terre reçoit encore les rayons de chaleur qu'émettent les étoiles, qui sont des sources analogues à celle dont nous venons de parler. Mais, à la distance pour ainsi dire infinie où se trouvent de nous les étoiles, la chaleur rayonnée par elles est affaiblie au point d'être inappréciable ; elle échappe à toute mesure. C'est l'ensemble de ces radiations éloignées, celle du Soleil excepté, qui détermine ce qu'on nomme la température des espaces interplanétaires, telle qu'elle a été calculée par divers savants. D'après Fourier, cette température est de 60 degrés centigrades au-dessous de 0 ; d'après M. Pouillet, elle est beaucoup plus basse, et ne doit guère surpasser 140° au-dessous de la fusion de la glace.

Enfin la surface de la Terre reçoit encore de la chaleur provenant de son intérieur, chaleur qui est propre au globe terrestre, ainsi que l'a démontré Fourier. A une certaine profondeur au-dessous du sol, on trouve une couche dont la température constante est à peu près la moyenne température du lieu. Au-dessous de cette couche, la température est croissante, et son augmentation moyenne est d'environ 1° par 30 mètres. Si cet accroissement de chaleur, qu'on a vérifié jusqu'à une profondeur qui dépasse 700 mètres, continue dans les couches plus profondes et dans la même proportion, à 3 kilomètres on trouverait déjà la température de l'eau bouillante, et à 40 kilomètres la plupart des matières minérales connues auraient atteint leurs points de fusion. Mais il reste à savoir si la pression énorme que subissent les couches terrestres, à partir de cette dernière profondeur, n'est pas un obstacle à leur liquéfaction : l'incandescence du noyau terrestre reste ainsi à l'état d'hypothèse.

§ III. CHALEUR DÉVELOPPÉE PAR LES COMBINAISONS CHIMIQUES.

Le Soleil est la source de chaleur la plus abondante et la plus économique : mais ce n'est ni la plus commode, puisque nous ne pouvons en disposer à notre gré, et que c'est précisément

quand elle fait défaut ou vient à s'affaiblir, que nous avons le plus besoin de chaleur; ni la plus intense, puisqu'à moins d'être concentrée à l'aide d'appareils dispendieux, elle ne produit que des températures relativement faibles. Aussi peut-on affirmer que la civilisation eût été impossible, si l'homme n'avait eu à sa disposition que la chaleur solaire, et n'avait trouvé, dans ce qu'on nomme les sources artificielles de chaleur, de quoi satisfaire aux plus indispensables besoins de son existence. C'est la combustion vive, c'est-à-dire la combinaison chimique de certains corps avec l'oxygène, qui constitue principalement les sources de ce genre, et le nom de sources artificielles vient de ce qu'on peut s'en servir à volonté, et régler leur intensité suivant les besoins du moment.

En général, toutes les fois que deux corps entrent en combinaison, de la chaleur se dégage. Ainsi, le mélange de l'eau et de l'acide sulfurique, de l'eau et d'une certaine quantité de chaux vive, est accompagné d'une élévation de température assez considérable, pas assez grande toutefois pour produire de la lumière. Le plus souvent, c'est la combinaison de l'oxygène, l'un des gaz constituants de l'air, avec certains corps simples, solides ou gazeux, qui, donnant lieu à un dégagement très-intense de chaleur accompagné de lumière, détermine le phénomène de la combustion vive. Mais, pour qu'un corps combustible puisse brûler, soit à l'air libre, soit dans l'oxygène pur, il faut porter d'abord l'un de ses points à une température élevée; en un mot, il faut l'allumer. Une fois la combinaison commencée, la chaleur qu'elle dégage se communique de proche en proche, jusqu'à ce que le gaz comburant soit entièrement épuisé, ou que le corps avec lequel il se combine se trouve complétement consumé. C'est ainsi que nous obtenons le feu dans nos foyers, la lumière de nos bougies et de nos lampes; et nous savons par expérience que ces sources de chaleur et de lumière ne durent qu'autant qu'on les entretient, c'est-à-dire qu'on leur fournit les deux éléments de la combustion.

Quand la combustion a lieu dans l'oxygène pur, elle est beaucoup plus vive qu'à l'air libre. En plongeant dans une cloche remplie de ce gaz une spirale d'acier portant un morceau d'amadou enflammé (fig. 327), on détermine une incandescence très-vive du métal, qui projette dans tous les sens une multitude d'étincelles.



Fig. 327. — Combustion du fer dans l'oxygène.

Le phénomène de la combustion est complexe, et ce n'est pas ici le lieu de l'analyser dans tous ses détails. Disons seulement que la flamme doit être distinguée des parties solides incandescentes : pour qu'un corps brûle avec flamme, il faut qu'il y ait dégagement de certains gaz sous l'influence d'une haute température, et ce sont ces gaz devenus lumineux qui produisent la lumière mobile dont il s'agit. Dans la flamme d'une bougie ou d'un bec de gaz, il y a trois régions distinctes où la chaleur et la lumière se trouvent associées en diverses proportions. A l'extérieur est le siége de la combustion la plus vive et de la température la plus élevée ; mais la lumière y est peu intense. Vient ensuite une couche très-lumineuse, où la combustion toutefois est moins complète et la chaleur moins vive, mais qui brille d'un grand éclat, à cause des parcelles très-fines de carbone qui s'y trouvent incandescentes. Enfin, à l'intérieur de la flamme, est un espace obscur et d'une température beaucoup plus basse, parce que, l'oxygène de l'air ne pouvant y pénétrer, les matières gazeuses qui le remplissent ne sont pas brûlées. Ce



Fig. 328. — Flamme d'une bougie.

n'est qu'en arrivant au sommet de la flamme, que ces matières brûlent à leur tour; quand cette combustion est incomplète, elles s'élèvent en fumée.

Si l'on souffle avec vivacité sur la flamme d'une bougie, tout le monde sait ce qui arrive : la bougie s'éteint. La raison du fait est très-simple; par l'insufflation, on introduit de l'air froid dans le gaz inflammable qui, en outre, se refroidit en se répandant dans une plus grande masse d'air. La température s'abaisse assez pour que la combustion cesse. Si, après avoir soufflé la flamme, la mèche est restée incandescente, en soufflant légèrement on la rallume, et cela se comprend encore. On renouvelle ainsi l'oxygène nécessaire à la combustion; le gaz se dégage de nouveau, et s'enflamme au contact des parties solides incandescentes.

Divers physiciens, depuis Laplace, Lavoisier et Rumford, jusqu'à Despretz, Dulong, Fabre et Silbermann, ont cherché à évaluer les quantités de chaleur qui se dégagent dans les combinaisons chimiques et notamment dans la combustion. Le nombre des calories qui se dégagent, quand on brûle l'unité de poids d'un corps combustible, est ce qu'on nomme alors la chaleur de combustion de ce corps. Nous ne pouvons décrire les méthodes qui ont servi dans ces recherches importantes; nous donnerons seulement quelques résultats, qui montrent combien les corps simples diffèrent sous ce rapport. Tandis que la chaleur de combustion du soufre natif est de 2260 calories (la calorie est ici la quantité de chaleur élevant de 1° le poids de 1 gramme d'eau), celle du carbone à l'état de diamant est 7770 calories, du même corps à l'état de



Fig. 329. — Chalumeau à gaz oxy-hydrogène.

graphite naturel, de 7796, et enfin à l'état de charbon de bois, de 8080 calories. L'hydrogène, brûlant dans le chlore, dégage 23783 calories, et le même gaz brûlant dans l'oxygène, 34462.

C'est la chaleur de combustion de l'hydrogène qui est de toutes la plus intense; on a calculé qu'elle correspond à une élévation de température de 6800 degrés; aussi s'est-on servi de ce dégagement de chaleur énorme, pour produire des températures extrêmement élevées. MM. H. Sainte-Claire Deville et Debray ont obtenu, par l'emploi du chalumeau à gaz oxy-hydrogène, la fusion de masses considérables de platine; 1 kilogramme de ce métal ne demande pour être fondu, et maintenu à l'état de fusion pendant toute la durée de l'affinage, qu'une combustion de 70 litres d'oxygène et de 120 litres d'hydrogène.

§ IV. CHALEUR DÉVELOPPÉE PAR LES ACTIONS MÉCANIQUES.

Les actions mécaniques, le frottement, la percussion, la compression développent de la chaleur, tout comme les mouvements plus intimes qui constituent les phénomènes de combinaisons chimiques. Les exemples abondent de cette transformation du mouvement en chaleur, et chacun de nous peut les observer aisément. Citons-en quelques-uns.

Un bouton de métal qu'on frotte vivement contre une étoffe ou tout autre corps solide, s'échauffe et devient brûlant : les écoliers connaissent à merveille ce moyen d'amusement ou de distraction. Le frottement d'une scie contre le morceau de bois qu'elle sert à diviser, celui d'un rasoir ou d'un couteau qu'on repasse sur une pierre, de la lime contre le métal qu'elle mord, élèvent la température des objets soumis à ce mouvement violent, et dont les molécules se trouvent ainsi ébranlées. Les étincelles que les fers des chevaux font jaillir sur le pavé, celles que produit le frottement de l'acier sur la roue du

rémouleur, ou encore celles qui enflamment l'amadou dans le maniement du briquet à silex, proviennent les unes et les autres de la haute température dégagée par le frottement : des parcelles métalliques très-fines se détachent, et la chaleur développée est suffisante pour porter d'aussi petites masses à l'incandescence[1].

Des morceaux de bois bien secs, frottés l'un contre l'autre, s'échauffent; de la fumée se dégage; et, si l'on en croit les récits des voyageurs, les sauvages arrivent même par ce moyen à se procurer du feu. Les tourneurs produisent les filets noirs, qu'on voit quelquefois sur les objets qu'ils travaillent, en pressant fortement une pièce de bois tranchante sur le point qu'ils veulent brunir. L'échauffement qui résulte de cette pression, jointe au mouvement rapide de rotation du tour, est assez fort pour carboniser le bois sur le pourtour de l'objet. Les tourillons des machines, les essieux des voitures, des wagons de chemins de fer, s'échauffent fortement par le frottement résultant d'une rotation rapide et prolongée. Ils prendraient feu, si l'on n'avait soin de les lubréfier en les graissant.

Il faut citer ici, comme exemple de l'énorme quantité de chaleur que peut dégager le frottement de deux corps solides l'un contre l'autre, l'expérience célèbre faite par Rumford en 1798; cette expérience avait été suggérée à ce célèbre physicien, pendant qu'il surveillait, à Munich, le forage des pièces de canon. Vivement frappé de la grande quantité de chaleur que dégageait cette opération, il voulut la mesurer d'une façon plus précise. Il fit donc disposer un cylindre métallique, destiné à l'opération du forage, dans une caisse en bois remplie d'eau, dont la température était donnée par un thermomètre plongé dans le liquide. Une heure après que le

1. « Avant l'invention des lampes de sûreté de Davy, le grisou était la grande plaie des houillères, et bien des mines restaient inexploitées, inabordables, à cause de la présence de cet invincible ennemi. Comme on ne pouvait se servir de lampes ordinaires, on avait imaginé d'éclairer les chantiers au moyen d'une roue d'acier tournant contre une pierre à fusil. »

(Simonin, la VIE SOUTERRAINE.)

frottement du foret contre le cylindre eut commencé, la température de l'eau, de 16° au début, s'élevait à 46°. Au bout de deux heures, elle était de 81°, et enfin une demi-heure plus tard, l'eau entrait en complète ébullition. « Il serait difficile, dit Rumford, de décrire la surprise et l'étonnement exprimés par le visage des assistants à la vue d'une si grande quantité d'eau (environ dix litres) chauffée et rendue bouillante sans le moindre feu. »

Le frottement des solides contre les liquides et contre les gaz développe aussi de la chaleur : une expérience de Joule, sur laquelle nous reviendrons, a mis en évidence l'échauffement d'une masse liquide, agitée par des palettes métalliques tournant autour d'un axe. C'est au frottement contre les couches de l'atmosphère qu'on attribue l'incandescence des aérolithes qui traversent, avec une vitesse considérable, l'enveloppe aérienne de notre globe. L'élévation de température causée par le frottement d'une masse gazeuse contre un corps solide est du reste mise hors de doute par une expérience très-simple, que Tyndall a faite dans ses conférences sur la chaleur : avec un soufflet, il lançait un courant d'air sur l'une des faces de la pile thermo-électrique; l'aiguille du galvanomètre était aussitôt déviée, et le sens de sa déviation indiquait que la face de la pile avait été chauffée par l'air en mouvement.

Terminons cette énumération de phénomènes, qui tous prouvent la génération de la chaleur par une force mécanique, en citant une expérience importante de Davy : cet illustre physicien parvint, en frottant l'un contre l'autre deux morceaux de glace bien essuyés, à fondre une certaine quantité d'eau solide. Voici ce qui donne un grand intérêt à cette expérience : pour expliquer le dégagement de chaleur que donne le frottement, les partisans de la matérialité de la chaleur, ceux qui la considéraient comme un fluide contenu dans les interstices des molécules des corps, raisonnaient ainsi : « Le frottement change la capacité calorifique des différents corps; il diminue cette capacité, de sorte que la chaleur emmagasinée avant

l'action mécanique ne peut plus séjourner tout entière dans le corps, après le changement moléculaire dont il s'agit : c'est cette chaleur qui se dégage par le frottement, et, de latente qu'elle était, devient sensible. » Or, l'expérience de Davy rend cette explication impossible. Rappelons-nous, en effet, que l'eau a une capacité calorifique double de celle de la glace : après la fusion d'une certaine quantité de glace, l'eau résultante contient plus de chaleur latente qu'auparavant; on ne pourrait donc comprendre d'où provient la chaleur qui a servi à produire le passage de la glace à l'état liquide. Et enfin, on conclut de là que c'est la force mécanique mise en jeu dans le frottement qui se transforme en chaleur, c'est-à-dire en une force d'un autre genre : il y a transformation d'un mouvement visible en un mouvement moléculaire ou atomique.

La percussion et la compression développent la chaleur comme le frottement. Ainsi, quand on enfonce un clou dans une pièce de bois à coups de marteau, non-seulement le clou s'échauffe, effet qui peut résulter en partie du frottement contre le bois, mais le marteau lui-même accuse une élévation de température. Une barre de ferre, battue à coups redoublés, peut s'échauffer assez pour rougir. Des flans d'or, d'argent, de cuivre, comprimés sous le balancier qui sert à frapper les monnaies, s'échauffent, mais l'élévation de température n'est pas la même pour les différents métaux. En général, la quantité de chaleur développée par les actions mécaniques dépend de la nature des substances soumises à ces actions, de l'état de leur surface, de la pression exercée.

La compressibilité des liquides est très-faible : néanmoins, en exerçant sur des masses liquides des pressions considérables, de 30 à 40 atmosphères par exemple, on a pu constater un dégagement de chaleur. La compression des gaz peut s'exercer dans des limites extrêmement étendues : aussi obtient-on une élévation de température assez considérable, quand on comprime brusquement une masse gazeuse dans un espace limité. C'est ce fait qui sert de principe au *briquet à air*, que nous

avons décrit dans le premier Livre de cet ouvrage (Voy. page 95, fig. 59). L'expansion d'un gaz produit l'effet inverse de la compression, c'est-à-dire un abaissement de température : du gaz acide carbonique, d'abord comprimé à 40 ou 50 atmosphères dans un récipient, se refroidit tellement par la dilatation que produit son passage à l'air libre, qu'il passe à l'état liquide et même à l'état solide ; et l'on voit des flocons, blancs comme la neige, d'acide carbonique solidifié. Leur température est alors de 93 degrés au-dessous de zéro.

Le même phénomène de refroidissement a lieu, quand la vapeur d'eau sort en jet par la soupape de la marmite de Papin. Sa dilatation subite est accompagnée d'un refroidissement qui la condense sous la forme de brouillard : en plongeant la main dans le jet de vapeur, on éprouve une sensation de fraîcheur qui étonne au premier abord. Il faut bien se garder de faire cette expérience, quand la vapeur contenue dans la chaudière n'est qu'à la pression atmosphérique ordinaire. En s'échappant dans l'atmosphère, à cette pression, elle conserverait la température de 100° ; on serait cruellement brûlé en y plongeant la main.

Pour terminer ce que nous avions à dire des sources de chaleur, nous mentionnerons encore celles que la vie entretient dans les êtres organisés, végétaux et animaux. Du reste, il paraît prouvé que la chaleur animale ou végétale a pour origine une série d'actions chimiques plus ou moins complexes, qui constituent les phénomènes de la nutrition, de la respiration et de l'assimilation des aliments.

§ V. LA CHALEUR EST UN MODE DE MOUVEMENT. — ÉQUIVALENT MÉCANIQUE DE LA CHALEUR.

Dans cette étude de la chaleur, nous avons eu à considérer deux ordres de phénomènes, inverses les uns des autres. D'une part, nous avons décrit les divers effets que produisent les va-

riations de la chaleur dans les corps; d'autre part, nous avons passé en revue les différents procédés à l'aide desquels on peut engendrer de la chaleur. Il nous reste à montrer quelles relations existent entre ces deux ordres de phénomènes, dont la dépendance réciproque, aujourd'hui démontrée, constitue la théorie mécanique de la chaleur.

Nous avons vu qu'un des effets de la chaleur est de dilater les corps, c'est-à-dire de produire des mouvements moléculaires qui augmentent les distances où les molécules se trouvent les unes des autres : considérée à ce point de vue, la dilatation n'est donc autre chose qu'un effet mécanique. Quand l'accroissement de chaleur atteint une certaine limite, il y a changement d'état, passage de l'état solide à l'état liquide, et de l'état liquide à l'état gazeux : c'est encore là un effet mécanique, car il ne paraît pas douteux que ces modifications dans l'aspect que peut nous présenter une même substance, sont dues à des variations dans les distances respectives des molécules et, par suite, dans les actions qu'elles exercent les unes sur les autres. Nous avons vu aussi l'augmentation de la chaleur donner aux vapeurs et aux gaz la force élastique qui, dans les machines modernes, remplace si avantageusement les anciens moteurs. Dans tous ces cas, la chaleur se transforme en force mécanique; ou, si l'on préfère, une certaine quantité de chaleur sert à produire un *travail dynamique*, bien qu'en plusieurs cas ce travail ne soit pas susceptible d'évaluation dans l'état actuel de la science.

Il n'est pas moins évident que toutes les fois qu'on produit de la chaleur, il y a dépense d'une certaine quantité de travail dynamique. Cela est certain pour la chaleur qu'engendrent le frottement, la percussion et la compression. Quant à celle qui se dégage dans les actions chimiques, on la regarde comme produite par les mouvements moléculaires qui constituent les combinaisons.

Cette corrélation entre la force qui donne naissance aux phénomènes de la chaleur, et les autres forces mécaniques, avait

été soupçonnée depuis longtemps; mais il était réservé à notre époque de la faire passer de l'état de vague hypothèse à l'état de théorie démontrée et vérifiée par l'expérience. C'est au docteur Mayer, de Heilbronn, petite ville d'Allemagne, que revient l'honneur d'avoir le premier nettement formulé la théorie, et d'en avoir développé les conséquences : dès 1842, il calculait l'*équivalent mécanique* de la chaleur, qu'un physicien anglais, M. Joule, déterminait de son côté une année plus tard, sans connaître les travaux du médecin allemand. Les noms de plusieurs autres physiciens se rattachent à l'élaboration de cette théorie importante ; il nous suffira de citer ceux de MM. Regnault et Hirn en France, Clausius en Allemagne, Thomson et Rankine en Angleterre. Essayons de donner une idée de ce qu'on entend par l'*équivalent mécanique de la chaleur*, et des expériences qui ont permis de mesurer cet équivalent.

Rappelons d'abord ce qu'en mécanique on entend par *travail dynamique*. Quand une puissance est employée, sur une machine en mouvement, à vaincre une résistance à laquelle elle fait équilibre, il est prouvé qu'il y a toujours égalité entre les produits qu'on obtient en multipliant, d'une part, la puissance par le chemin que parcourt son point d'application, et de l'autre, la résistance par le chemin que parcourt aussi le point d'application de cette dernière. Par exemple, si une puissance évaluée à 10 kilogrammes fait équilibre à une résistance de 30 kilogrammes, et que le chemin parcouru par celle-ci suivant sa direction soit de 1 mètre, le chemin parcouru par la puissance pendant le même temps sera 3 mètres. Il y aura égalité entre les deux produits 10×3 et 30×1. On donne le nom de *travail* à chacun de ces produits : le premier est le *travail moteur*, et le second le *travail résistant*. On est convenu de prendre pour unité de travail, ou *unité dynamique*, le travail développé par l'élévation à 1 mètre de hauteur d'un poids de 1 kilogramme. C'est cette unité qu'on désigne sous le nom de *kilogrammètre*. D'une part, nous avons vu que les quantités de chaleur s'évaluent en calories, en enten-

dant par calorie la chaleur nécessaire pour élever de 0° à 1° centigrade la température de 1 kilogramme d'eau. Le problème que se posèrent les physiciens dont nous venons de citer les noms était celui-ci :

Déterminer par l'expérience et par le calcul le nombre de kilogrammes que produit la dépense d'une calorie, ou, ce qui revient au même, le nombre de kilogrammètres nécessaires pour engendrer la quantité de chaleur que renferme une calorie. C'est ce nombre que Mayer a nommé l'*équivalent mécanique de la chaleur.*

Toutes les expériences qui ont eu pour objet la détermination de ce nombre important consistent essentiellement à produire une certaine quantité de chaleur à l'aide d'une action mécanique, et à mesurer avec soin d'une part la chaleur engendrée, d'autre part le travail dynamique dépensé dans l'opération, en tenant compte, bien entendu, des pertes de chaleur ou de travail. Voici diverses expériences dues à Joule.

Il comprimait de l'air, à l'aide d'une pompe foulante, dans un vase métallique plongé dans l'eau d'un calorimètre. Après un nombre déterminé de coups de piston, la pression de l'air ayant atteint un certain nombre d'atmosphères, il observait l'élévation de température de l'eau, et en déduisait la quantité de chaleur cédée à ce liquide. L'échauffement n'étant pas dû tout entier à la compression de l'air, mais aussi au frottement du piston, il recommençait l'opération en laissant communiquer le récipient avec l'atmosphère, c'est-à-dire sans comprimer l'air. La chaleur produite par cette opération nouvelle était celle due au frottement dans la première opération. Joule trouva, en employant cette méthode, 444 kilogrammètres pour l'équivalent mécanique de la chaleur.

En faisant tourner une roue à palettes dans l'eau ou dans le mercure (fig. 330), le même physicien observait l'élévation de température du liquide, et pouvait pareillement en déduire le nombre de calories créées par le frottement. D'autre part, il mesurait aisément le travail dépensé pour obtenir le mouve-

ment de rotation. Ce mouvement étant obtenu par la chute de deux poids enroulés, à l'aide d'un double cordon, d'un côté à l'axe des palettes, de l'autre à deux poulies, le travail dépensé était égal au produit des deux poids par la hauteur de chute de chacun d'eux. Joule trouva par cette méthode le nombre de 432 kilogrammètres.

En résumé, il résulte d'un assez grand nombre d'expériences faites par divers physiciens, que l'équivalent mécanique de la chaleur est environ 425 kilogrammètres. Cela revient à dire, d'après la définition donnée plus haut, que la quantité de

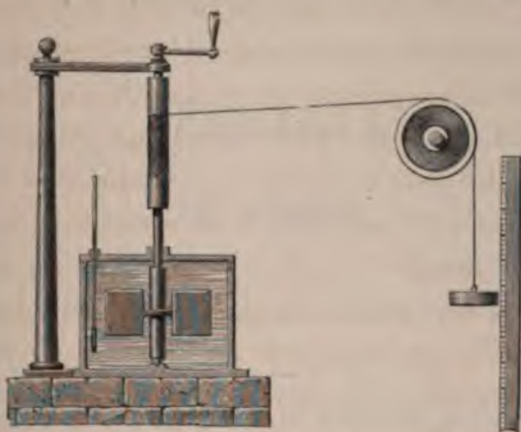


Fig. 330. — Expérience de Joule. Détermination de l'équivalent mécanique de la chaleur.

chaleur nécessaire pour élever d'un degré centigrade la température d'un kilogramme d'eau, est susceptible, si on la dépense tout entière, d'élever un poids de 425 kilogrammes à 1 mètre de hauteur. Réciproquement, quand un travail dynamique égal à 425 kilogrammètres se transforme complétement en chaleur, la chaleur produite est capable d'élever de 1° la température d'un kilogramme d'eau.

Ainsi la transformation de la force mécanique en chaleur et de la chaleur en force mécanique est désormais un fait acquis à la science; fait capital qui jette un grand jour sur la nature de la cause à laquelle il faut attribuer les phénomènes que nous avons étudiés dans ce quatrième Livre. L'étude des

lois de la chaleur rayonnante nous avait déjà conduit à assimiler les ondes calorifiques aux ondes lumineuses, et à regarder la chaleur elle-même comme produite par certaines vibrations de l'éther. En pénétrant à l'intérieur des corps, il est probable que la chaleur communique à leurs molécules certains mouvements qui, transformés de diverses manières, tantôt changent le volume des corps, tantôt modifient leur état physique, tantôt enfin produisent des effets plus intimes, de nature à changer le mode d'association des atomes élémentaires. Ce sont ces mouvements enfin qui, en se propageant dans nos organes, nous donnent la sensation de la chaleur.

LIVRE CINQUIÈME.

LE MAGNÉTISME ET L'ÉLECTRICITÉ.

CHAPITRE I.

LES AIMANTS.

§ I. PHÉNOMÈNES D'ATTRACTION ET DE RÉPULSION MAGNÉTIQUES.

Les minéralogistes donnent le nom de *fer oxydulé* ou de *fer magnétique* à un minerai de ce métal, qu'on rencontre dans un grand nombre de mines d'Europe et d'Amérique, notamment en Suède, dans l'île d'Elbe, aux États-Unis; on l'exploite depuis quelque temps à Bone (Algérie); et enfin, d'après les anciens auteurs, on le trouvait jadis en Asie Mineure, aux environs de deux villes portant l'une et l'autre le nom de Magnésie. Le minéral dont il s'agit est un composé de protoxyde et de sesquioxyde de fer, dont la teinte, ordinairement noire ou brune, quelquefois grisâtre, a un éclat métallique. Certains échantillons ont la propriété, connue depuis la plus haute antiquité, d'attirer les morceaux de fer qu'on place à une distance convenable de quelques-uns de leurs points : ce sont alors des *aimants naturels* ou, comme on dit vulgairement, des *pierres d'aimant*. Nous verrons bientôt

comment on peut communiquer à l'acier trempé la vertu attractive de l'aimant naturel; les morceaux ou barreaux d'acier ainsi préparés se nomment des aimants *artificiels*.

Le fer n'est pas la seule substance susceptible d'être attirée par les aimants : il en est de même de plusieurs autres métaux, le cobalt, le nickel, le chrome, le manganèse. La fonte, l'acier et tous les échantillons de fer oxydulé qui ne sont pas eux-mêmes des aimants possèdent aussi la même propriété. On range tous ces corps sous la même dénomination de *substances magnétiques* [1].

Les phénomènes que nous allons décrire sont restés ignorés pendant des siècles, comme ceux de l'électricité, et cependant les anciens connaissaient les deux faits principaux qui ont été, entre les mains des observateurs modernes, les deux points de départ de deux branches de la physique aujourd'hui réunies. L'attraction de l'ambre jaune pour les corps légers, celle de la pierre d'aimant pour le fer n'étaient à leurs yeux que des jeux, des singularités de la nature : aujourd'hui ce sont, parmi des milliers d'autres, deux manifestations particulières d'un même agent universellement répandu et perpétuellement en action dans le monde physique.

L'attraction des aimants, naturels ou artificiels, pour les substances magnétiques est aisée à mettre en évidence. Voici quelques-uns des procédés qu'on emploie dans ce but.

On plonge l'aimant dans un amas de limaille ou de battiture de fer, et on remarque, en le retirant, qu'en certains points de sa surface une multitude de parcelles du métal se sont comme attachées en forme de houppes plus ou moins

1. L'étymologie des mots *magnétisme*, *magnétique*, est l'un des noms grecs de l'aimant, μαγνήτης, que les anciens eux-mêmes considéraient comme dérivé des noms des deux villes de Magnésie, aux environs desquelles on trouvait, dit-on, des pierres d'aimant. Aristote appelait l'aimant simplement λίθος, la pierre par excellence. Enfin on l'appelait aussi *pierre de fer*, *pierre de Lydie*, *pierre d'Hercule*, ἡράκλεια λίθος. D'après M. Th. H. Martin, c'est cette dernière dénomination, qu'on interprétait à tort comme synonyme de pierre d'Héraclée, un des noms de la ville de Magnésie, qui a entraîné les anciens eux-mêmes à donner à l'aimant le nom de μαγνήτης, nom que les Latins lui ont conservé.

grandes (fig. 331). En approchant les mêmes points de morceaux de fer d'une certaine dimension, de clous par exemple, on voit ceux-ci se précipiter sur l'aimant, et s'y attacher avec une force dont on peut apprécier l'énergie par l'effort nécessaire pour les en détacher. A l'aide du *pendule magnétique*, qui consiste en une bille de fer ou de toute autre substance magnétique suspendue à un fil, on constate encore aisément l'attraction que l'aimant exerce sur cette substance. Le même appareil fait voir aussi que l'attraction, nulle aux points où la limaille de fer ne s'était point attachée, est maximum là où s'étaient formées les plus longues houppes.



Fig. 331.— Attraction du fer par un aimant naturel ou artificiel.



Fig. 332. — Pendule magnétique.

Du reste, l'attraction des aimants pour les substances magnétiques est réciproque. Ainsi un morceau de fer, approché d'un barreau aimanté rendu mobile par le mode de suspension que représente la figure 333, attire le barreau et le fait mouvoir autour de l'axe de suspension.

Ces dernières expériences prouvent aussi que l'attraction magnétique s'exerce à distance, et croît en intensité quand la distance diminue; nous verrons plus loin d'après quelle loi. Mais, à distance égale, cette même action n'est nullement affaiblie par l'interposition des corps, soit liquides, soit solides, pourvu que ce ne soit pas des substances magnétiques. Ainsi, avec un aimant qu'on promène au-dessous d'une feuille de papier, de carton, d'une plaque de verre, de bois, de porce-



Fig. 333. — Attraction d'un barreau aimanté par le fer.

laine, on fait mouvoir les morceaux de fer placés à la surface de ces feuilles ou de ces plaques.

Si les aimants, naturels ou artificiels, et les substances magnétiques s'attirent réciproquement, cela ne veut point dire que les propriétés des uns et des autres soient les mêmes. Il y a une différence capitale, que nous devons dès maintenant signaler, c'est que les substances simplement magnétiques ne s'attirent pas entre elles : un morceau de fer, qui attire un aimant, est sans action sur du fer; du moins, s'il n'est pas dans le voisinage d'un aimant. Il y a encore une autre différence sur laquelle nous allons nous étendre, c'est qu'un mor-

ceau de fer subit l'attraction en tous ses points, tandis que dans un aimant, la propriété attractive est inégalement distribuée : nous avons vu déjà qu'elle est nulle en certains points et maximum en d'autres. Les expériences qui suivent vont mettre en évidence cette différence caractéristique entre les substances magnétiques et les aimants.

En examinant un aimant qu'on a plongé dans la limaille de fer (fig. 331) on voit que cette limaille, non-seulement s'est attachée plus particulièrement en deux régions opposées, mais en outre affecte dans l'arrangement de ses parcelles une

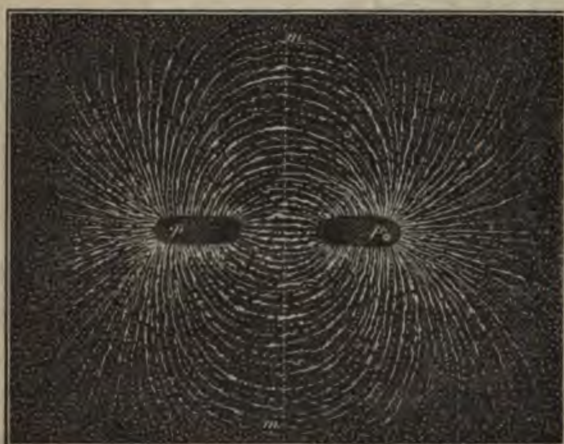


Fig. 334. — Spectre magnétique. Distribution de la limaille de fer sur un aimant.

direction spéciale, comme si, dans chaque région où l'attraction est la plus forte, il y avait un centre d'attraction. Vers le milieu du barreau, au contraire, on remarque une région où aucune parcelle de fer ne s'est attachée. On nomme *pôles* de l'aimant les deux points extrêmes dont nous parlons, *ligne neutre* la section moyenne de l'aimant. Voici un procédé qui montre d'une façon plus saisissante encore l'existence des pôles et de la ligne neutre. On place, sur le barreau qui constitue l'aimant, une feuille de carton qu'on saupoudre, avec un tamis, de limaille de fer très-fine. On voit alors les parcelles se disposer d'une façon régulière autour des points p et p', qui correspon-

dent aux pôles de l'aimant, et former des files convergentes et symétriques par rapport à la ligne neutre *mm'* (fig. 334).

Quelquefois, un aimant possède plus de deux pôles : outre les pôles extrêmes dont nous venons de constater l'existence, ils présentent des points intermédiaires, où la limaille vient s'attacher, et qui sont d'ailleurs séparés les uns des autres par des lignes neutres, comme on le voit dans le sceptre magnétique que représente la figure 335. On les nomme des *points conséquents*. Il est facile maintenant d'exprimer la différence qui existe entre les aimants et les substances magnétiques. Ces dernières n'ont ni pôles, ni lignes neutres : quels que



Fig. 335. — Points conséquents, ou pôles secondaires des aimants.

soient ceux de leurs points qu'on présente aux pôles d'un aimant, il y a toujours réciprocité d'attraction, tandis qu'un aimant ne peut agir que par ses pôles.

Les expériences précédentes sont relatives aux actions réciproques qu'exercent, les uns sur les autres, les corps magnétiques et les aimants : étudions maintenant l'action des aimants sur les aimants.

Prenons deux ou plusieurs barreaux aimantés; suspendons-les par leurs milieux, et approchons successivement les deux pôles de l'un quelconque d'entre eux des deux pôles de chacun des autres. Voici ce que nous observerons : en présentant un pôle donné du premier aimant aux deux pôles du second aimant, il y aura attraction pour l'un, répulsion pour l'autre; le même phénomène aura lieu pour les pôles de tous les autres. Tous les pôles attirés par le pôle M du barreau d'épreuve sont dits *pôles de même nom ;* marquons-les de la

lettre A. Tous les pôles repoussés par le même pôle M sont aussi des pôles de même nom, puisque sur eux l'action est de même sens dans les mêmes circonstances; marquons-les de la lettre R. Si maintenant on présente le pôle opposé N de l'aimant d'épreuve à chacun des pôles des autres barreaux aimantés, on trouve qu'il repousse précisément tous les pôles A et qu'il attire les pôles R; ainsi de toute façon, les deux pôles opposés d'un même aimant sont des pôles de noms contraires.

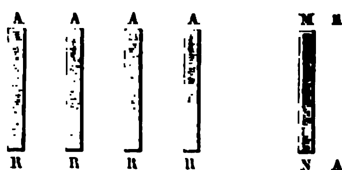


Fig. 336. — Attraction et répulsion des pôles des aimants.

Voyons maintenant comment agissent l'un sur l'autre deux pôles de même nom. Approchons l'un de l'autre deux quelconques des pôles A, ou encore deux quelconques des pôles R; dans les deux cas, nous trouverons qu'ils se repoussent. Si, au contraire, on met en présence deux pôles de noms contraires, un pôle A et un pôle R, on remarque qu'ils s'attirent; ce qui prouve que, dans l'expérience précédente, le pôle M du barreau d'épreuve est de même nom que les pôles R, et le pôle N de même nom que les pôles A.

Résumons tout cela dans un seul énoncé :

Les pôles opposés d'un même aimant sont de noms contraires : si l'action de l'un des deux sur un pôle donné d'un aimant est *attractive*, l'action du second est *répulsive ;*

Les pôles de même nom de deux aimants quelconques se repoussent; les pôles de noms contraires s'attirent.

Voilà donc une nouvelle distinction qui sépare radicalement les substances magnétiques telles que le fer doux, des aimants artificiels ou naturels, et qui permet de reconnaître si un barreau d'acier ou un échantillon de fer oxydulé est ou non un aimant. Il suffit de constater la façon dont se comporte un aimant en présence du barreau ou du morceau de minerai. S'il y a attraction dans tous les points, ce n'est pas un aimant; mais s'il y a attraction pour une extrémité, répulsion pour

l'autre, c'est un aimant, non simplement un substance magnétique.

On appelle *aimantation* l'acte par lequel on donne à une substance la propriété d'attirer le fer et les autres corps magnétiques : la substance aimantée possède alors deux pôles et une ligne neutre. Cette propriété peut être permanente ou temporaire : elle est permanente dans les aimants naturels ou dans les barreaux d'acier, aimantés par des procédés dont nous parlerons bientôt. L'expérience suivante prouve qu'elle est temporaire dans les substances magnétiques, en contact avec l'un des pôles d'un aimant.


Fig. 337. — Aimantation par influence au contact.

On soulève à l'aide d'un barreau aimanté un petit cylindre de fer doux : celui-ci se trouve aimanté par influence ; car en approchant de son extrémité un second cylindre de fer, celui-ci subit une attraction et se trouve soulevé lui-même. On peut former ainsi ce qu'on nomme une *chaîne magnétique*, composée, à la suite du barreau aimanté, de morceaux de fer qui s'attirent et se soulèvent successivement les uns les autres. Meis qu'on vienne à éloigner l'aimant du premier morceau de fer doux en contact avec lui ; à l'instant tous les autres tombent, perdant ainsi l'aimantation temporaire dont la présence de l'aimant les avait doués. Chaque morceau de fer doux était devenu momentanément un aimant avec ses deux pôles et sa ligne neutre ; et, ce qui le prouve, c'est que si l'on forme le spectre magnétique pendant le contact de l'aimant et du prisme, la limaille se dispose dans la région qui correspond à celui-ci, comme dans l'aimant lui-même. On observe du reste

que la ligne neutre est plus rapprochée du pôle voisin de l'aimant que de l'autre. L'aimantation par influence n'exige pas le contact absolu; il faut seulement que la distance du pôle de l'aimant et du morceau de fer doux qui acquiert momentanément le magnétisme polaire, soit suffisamment petite : et



Fig. 338. — Aimantation par influence à distance.

l'on conçoit que cette distance dépend de l'énergie de l'aimant qu'on emploie.

Quand on brise en deux ou plusieurs fragments un barreau aimanté, chaque fragment devient, quelque petit qu'il soit, un aimant complet avec ses deux pôles et sa ligne neutre; seulement sa force magnétique n'est plus aussi énergique que dans l'aimant primitif, ce dont on peut s'assurer aisément

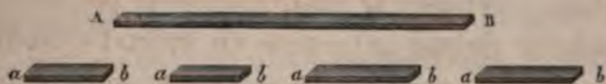


Fig. 339. — Rupture d'un aimant; disposition des pôles dans les fragments.

par les poids de fer doux que les uns et les autres sont susceptibles de porter. Les divers aimants qui proviennent de cette rupture ont leurs pôles de noms contraires, *a*, *b*, situés en regard, c'est-à-dire situés aux deux extrémités des fragments voisins qui étaient en contact avant la rupture, ainsi que le montre la figure 339.

On nomme *aiguille aimantée* un losange d'acier doué de la propriété commune aux aimants, c'est-à-dire ayant un pôle à chaque extrémité et en son centre sa ligne neutre. Un ai-

mant de ce genre suspendu horizontalement par un étrier de papier à un fil sans torsion, ou bien monté sur un pivot à l'aide d'une chape d'agate (fig. 340), de façon à pouvoir tourner librement dans toutes les directions, finit toujours, après quelques oscillations, par prendre dans le plan horizontal une direction déterminée, à peu près invariable, ou du moins qui n'est soumise qu'à des variations de faible amplitude.

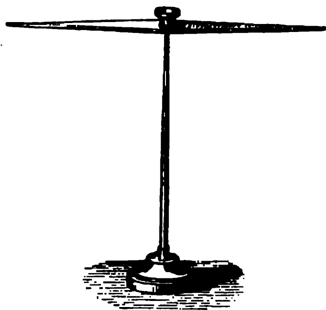


Fig. 340. — Aiguille aimantée.

Cette propriété de l'aiguille aimantée de tourner l'un de ses pôles vers l'horizon du nord est utilisée depuis des siècles par les navigateurs[1]. Toutefois, ce n'est pas vers le nord même que se tourne l'aiguille, de sorte que le plan vertical passant par ses pôles ne coïncide pas avec le plan méridien du lieu. L'angle de ces deux plans est ce qu'on nomme la *déclinaison de l'aiguille aimantée* ou simplement la *déclinaison*. Nous verrons, en parlant plus loin du *magnétisme terrestre*, que la déclinaison n'est pas la même pour tous les lieux de la Terre, qu'en certaines régions elle est nulle, qu'en d'autres régions elle est orientale et dans d'autres enfin occidentale; de plus, dans le même lieu, elle varie avec le cours des siècles. Aujourd'hui, à Paris, la déclinaison est occidentale, et environ de 18° 30′, c'est-à-dire que le plan vertical passant par les pôles de l'aiguille aimantée, — plan qu'on nomme *méridien magnétique* — fait avec le plan méridien géographique un angle de 18 degrés et demi. L'un des pôles de l'aiguille est à peu de chose près tourné au N. N. O.

1. Il paraît certain que dès le second siècle avant l'ère vulgaire, les Chinois se servaient de *chars indicateurs du sud*. Ces chars portaient une petite statuette, qui tournait sur un pivot vertical, et dont le bras étendu montrait toujours le sud, parce qu'il contenait une aiguille aimantée, dont le pôle sud était vers la main, et le pôle nord vers l'épaule. » (Th. H. Martin.)

La boussole à aiguille flottante était connue des Arabes, qui l'ont sans doute transmise aux Européens vers le douzième siècle.

Cette constance dans la direction des aimants librement suspendus dans un plan horizontal peut se constater très-simplement à l'aide d'une aiguille à coudre aimantée. En la po-

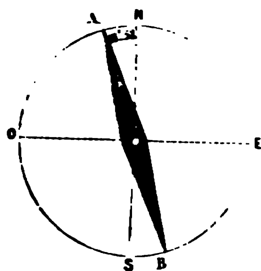


Fig. 341. — Déclinaison magnétique à Paris. Octobre 1864.

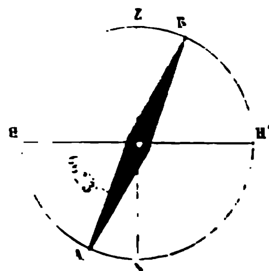


Fig. 342. — Déclinaison de l'aiguille aimantée à Paris. — Octobre 1864.

sant sur un petit flotteur de liége qu'on place sur une eau bien calme, l'aiguille, sans se déplacer horizontalement, tourne sur elle-même et prend la direction que nous venons d'indiquer. Il y a d'ailleurs entre les deux pôles de l'aiguille une différence très-caractérisée ; car si, quand l'aiguille est en équilibre, on la retourne bout à bout, elle ne conserve pas sa position nouvelle, quand même la direction qu'on lui a donnée est identique avec la première ; on la voit alors tourner sur elle-même, décrire une demi-circonférence et reprendre sa position primitive, de sorte que c'est toujours le même pôle qui se tourne du côté du nord.

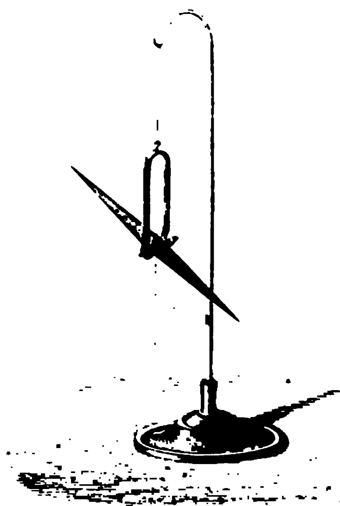


Fig. 343. — Aiguille aimantée donnant à la fois l'inclinaison et la déclinaison.

Si, au lieu de placer l'aiguille aimantée de façon qu'elle puisse tourner librement dans un plan horizontal, on la suspend par son centre de gravité autour d'un axe horizontal, elle pourra tourner ainsi librement dans un plan vertical. Supposons que ce

plan soit le méridien magnétique. Alors celui des deux pôles qui se tournait vers le nord s'incline, et plonge au-dessous de l'horizon, faisant avec ce plan un angle qu'on nomme l'*inclinaison magnétique*. En certaines régions de la Terre, voisines de l'équateur, l'inclinaison est nulle; elle augmente ordinairement à mesure qu'augmente la latitude, et il y a, près des pôles, des points où cet angle est droit, l'aiguille aimantée s'y maintenant dans une position verticale : ce sont les *pôles magnétiques* de la Terre. A Paris, l'inclinaison, qui varie légèrement d'une année à l'autre, est aujourd'hui de 66° environ.

On peut disposer une aiguille aimantée, de façon qu'elle se place d'elle-même dans le méridien magnétique, et s'incline à l'horizon comme nous venons de le dire. La figure 343 montre que l'aiguille peut tourner autour d'un axe horizontal passant par son centre, et qui s'appuie lui-même sur une fourchette suspendue par un fil sans torsion. Le système commence par osciller, jusqu'à ce que l'aiguille soit dans le plan magnétique, et là elle s'incline d'une quantité constante égale à l'inclinaison du lieu. Nous aurons ailleurs l'occasion de décrire les instruments qui permettent de mesurer avec précision l'inclinaison et la déclinaison de l'aiguille aimantée : c'est à ces instruments qu'on donne le nom de *boussoles*.

Que résulte-il de ces nouvelles expériences? C'est que le globe terrestre exerce sur un aimant une influence tout à fait semblable à celle qu'un aimant exerce sur un autre aimant. Les choses se passent comme si, à l'intérieur de la Terre, existait un aimant puissant ayant lui-même deux pôles. Les physiciens se sont arrêtés à cette hypothèse qui, du reste, n'implique nullement l'existence d'une masse matérielle analogue aux aimants naturels et gisant dans les couches profondes de notre sphéroïde, comme nous le verrons bientôt en étudiant les rapports qui existent entre les phénomènes magnétiques et l'électricité. Si la Terre est assimilée à un aimant, on nommera tout naturellement *pôle magnétique boréal*, celui qui



AURORE POLAIRE BORÉALE



AURORE POLAIRE BORÉALE

observée à BOSSEKOP (FINMARK) le 19 Janvier 1839

A 7 h 40 m du soir

est dans l'hémisphère du nord, et *pôle magnétique austral* celui qui est dans l'hémisphère du sud. Mais d'après ce que nous avons vu plus haut, ce sont les pôles de noms contraires qui s'attirent, et ceux de même nom qui se repoussent; il en résulte que le pôle de l'aiguille aimantée qui prend une direction voisine du nord est le *pôle austral* de l'aiguille, tandis que le pôle tourné vers le sud est son *pôle boréal*. Quand on n'a égard qu'à la position réelle de l'aiguille, on nomme *pôle nord* son pôle austral, et *pôle sud* son pôle boréal. Du reste, si l'on a bien saisi la loi de l'action mutuelle de deux aimants, ces dénominations ne peuvent pas prêter à l'équivoque.

L'inclinaison et la déclinaison de l'aiguille aimantée sont sujettes, dans les diverses régions du globe, à des variations dont les unes sont périodiques, tandis que les autres semblent irrégulières. Quelquefois même, l'aiguille éprouve des perturbations brusques, comme si le globe terrestre était le siége de véritables orages magnétiques : alors on aperçoit, vers les régions polaires, des phénomènes lumineux visibles à de grandes distances, connus sous le nom d'*aurores boréales ou australes*. La planche IX représente une aurore polaire observée dans le nord de la presqu'île Scandinave. Nous reviendrons sur la description du phénomène dans le Livre VII consacré aux *Météores atmosphériques*.

§ II. LOI DES ATTRACTIONS ET DES RÉPULSIONS MAGNÉTIQUES.

Jusqu'ici, nous n'avons parlé que du sens des actions que les aimants exercent entre eux ou sur les substances magnétiques. On a, en outre, évalué les intensités des forces d'attraction et de répulsion qui résident dans les pôles des aimants. Coulomb a employé dans ce but un appareil analogue à la balance de torsion qui lui avait servi à mesurer les forces électriques : c'est la *balance magnétique*, représentée dans la figure 344.

Un long barreau aimanté est suspendu par un fil métallique, de façon à se placer dans le méridien magnétique sans qu'il y ait aucune torsion du fil. Si l'on fait tourner le fil, de manière à écarter le barreau de cette position initiale, et à lui faire faire avec elle un certain angle, la force de torsion sera équivalente à l'intensité de l'action de l'aimant terrestre qui tendrait à ramener le barreau dans le méridien magnétique. Coulomb a commencé par s'assurer que cette intensité est proportionnelle à l'angle d'écart du barreau,

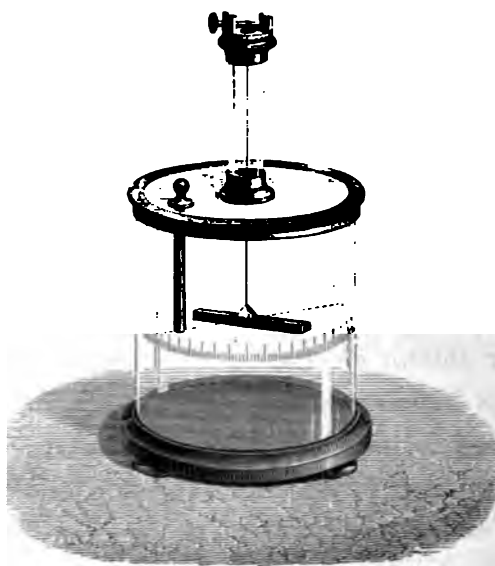


Fig. 344. — Balance magnétique de Coulomb.

pour de petites déviations. Si l'on place alors verticalement un autre aimant dans le méridien, et qu'on mette en regard les pôles de même nom, il y a répulsion : le barreau mobile tourne jusqu'à une certaine position d'équilibre, pour laquelle la force répulsive des deux aimants se mesure par la somme de deux forces : l'intensité magnétique terrestre d'une part, la force de torsion développée dans le fil d'autre part. Si maintenant, par la rotation d'un micromètre situé à la partie supérieure du tube de l'appareil, on cherche à rapprocher les deux pôles à des distances de plus en plus petites, et si, à chaque

opération, on évalue les intensités de la force répulsive, on reconnaît la loi que Coulomb a découverte, et dont voici l'énoncé :

Les répulsions magnétiques varient en raison inverse des carrés des distances auxquelles elles s'exercent.

Par une autre méthode, qui consiste à compter les nombres d'oscillations qu'une aiguille aimantée effectue, quand on met l'un de ses pôles en présence du pôle de nom contraire d'un autre aimant, à des distances différentes, Coulomb a démontré que la même loi, celle de la variation en raison inverse du carré des distances, s'applique aux attractions magnétiques comme aux répulsions. Nous verrons bientôt que c'est aussi celle qui régit les forces électriques.

§ III. PROCÉDÉS D'AIMANTATION.

Nous avons dit, au début de ce chapitre, que des masses d'acier sont susceptibles d'acquérir les propriétés des aimants naturels : pour obtenir ce résultat, on emploie divers procédés que nous allons maintenant décrire.

Le plus ancien de tous les moyens d'aimantation est celui de la *simple touche*, qui consiste à mettre le pôle d'un aimant en contact avec l'une des extrémités d'un barreau d'acier trempé. Au bout d'un certain temps, le barreau se trouve aimanté, et il acquiert un pôle à chacune de ses extrémités. On obtient une aimantation plus énergique, en faisant glisser l'aimant à plusieurs reprises d'un bout à l'autre du barreau qu'on veut aimanter (fig. [illegible]). La friction doit se faire toujours avec le même pôle et dans le même sens. Le pôle [illegible] commence le mouvement est [illegible] de l'aimant qu'on met en contact avec le barreau [illegible]



Fig. [illegible]. — [illegible]

Il y a divers procédés d'aimantation qu'on désigne [illegible]

précédent — seul connu jusqu'au milieu du siècle dernier — par la dénomination commune de méthode de la *double touche*, parce qu'on emploie deux aimants au lieu d'un seul. Nous décrirons seulement le procédé d'Æpinus et celui de Duhamel.

Le barreau à aimanter *a b* est posé par ses deux extrémités sur les pôles contraires de deux aimants puissants, A′ B′. On

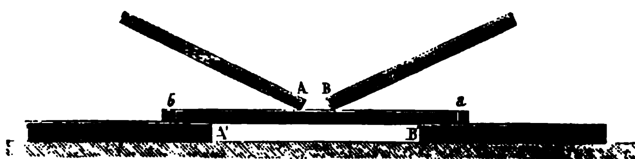


Fig. 346. — Aimantation par la méthode de la double touche séparée. Procédé de Duhamel.

prend alors deux autres aimants A, B, qu'on incline de 25 à 30 degrés sur le milieu du barreau, en mettant en regard leurs deux pôles contraires, et en ayant soin que chacun de ces pôles soit du côté du pôle du même nom, appartenant aux aimants fixes A′ B′. Si l'on fait alors glisser dans un sens opposé, et à plusieurs reprises, les aimants mobiles, sans changer leur inclinaison, on développe le magnétisme polaire dans le barreau d'acier, qui acquiert deux pôles *a b* de noms contraires aux pôles BB′, AA′ des aimants employés. C'est là le procédé de Duhamel : il donne une aimantation énergique, mais peu régulière, et produit quelquefois des points conséquents.

Le procédé d'Æpinus ne diffère de celui de Duhamel qu'en ce que les deux aimants mobiles sont inclinés de 45 à 50 degrés, et qu'après les avoir mis au contact et liés ensemble au milieu du barreau d'acier, on les fait glisser à la fois d'une extrémité du barreau à l'autre. L'aimantation ainsi obtenue, plus énergique que la précédente, est plus régulière. Aussi emploie-t-on de préférence la *double touche sé-*

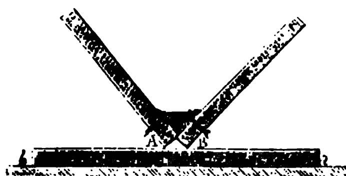


Fig. 347. — Aimantation par la méthode d'Æpinus.

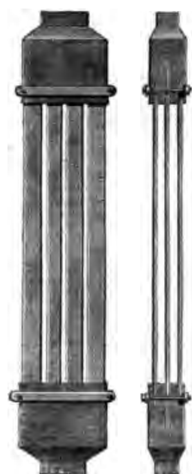
parée, quand on veut aimanter des aiguilles destinées aux boussoles.

On peut aimanter encore les barreaux d'acier ou même ceux de fer doux, sans avoir besoin d'aimants artificiels ou naturels. On les place dans le plan du méridien magnétique, en leur donnant la direction de l'aiguille d'inclinaison. Dans cette position, une barre d'acier s'aimante à la longue, et conserve toutes les propriétés d'un aimant ; une barre de fer doux devient un aimant, mais seulement un aimant temporaire : l'action magnétique du globe terrestre l'aimante ainsi par influence. Mais si l'on frappe alors énergiquement l'une de ses extrémités avec un marteau, la force magnétique de la barre, non-seulement se trouve accrue, mais devient permanente. Des morceaux de fil tordus fortement, pendant qu'on les maintient dans la direction de l'aiguille d'inclinaison, s'aimantent : et, si on les réunit par leurs pôles de même nom en un seul faisceau, on obtient un aimant assez puissant. Il suffit d'ailleurs, pour aimanter ainsi par l'action de l'aimant terrestre ou du magnétisme du globe, de tenir verticale la barre de fer ou d'acier, en même temps qu'on frappe une des extrémités à coups de marteau. Cette barre se trouve toujours de la sorte dans le plan du méridien magnétique, mais sans avoir l'inclinaison de l'aiguille aimantée.

Cette action de la Terre explique bien comment il se fait que dans les ateliers où l'on travaille l'acier ou le fer, un grand nombre d'outils deviennent des aimants. Les pelles, les pincettes, les espagnolettes des fenêtres [illegible] de fer qui se trouvent [illegible] à l'horizon s'aimantent [illegible] montent les [illegible] de parler de l'aim[illegible] mais il y a longtemps [illegible] au fer la vertu magnétique [illegible] cyclopédie de d'Alembert et de Diderot [illegible] jour dans une [illegible]

couteaux et de fourchettes d'acier destinés à aller sur mer; le tonnerre entra par l'angle méridional de la chambre justement où étoit la caisse; plusieurs couteaux et fourchettes furent fondus et brisés ; d'autres, qui demeurèrent entiers, furent très-vigoureusement aimantés, et devinrent capables de lever des gros clous et des anneaux de fer, et cette vertu magnétique leur fut si fortement imprimée, qu'elle ne se dissipa pas en les faisant rougir. »

La force des aimants peut s'altérer à la longue; les chocs, les changements de température et enfin l'action de la Terre sont les causes de cette altération. Cette force dépend du volume de l'aimant, de sa forme, de la trempe de l'acier. Ainsi, dans deux barreaux aimantés semblables, l'intensité magnétique est proportionnelle aux volumes, ou ce qui revient au même, aux cubes des dimensions homologues; et, cependant, on a remarqué que les petits aimants sont proportionnellement plus puissants que les gros : on en a vu qui supportaient des morceaux de fer, dont le poids valait cent fois leur propre poids. C'est ce qui a donné l'idée de former des aimants en réunissant par leurs pôles de même nom une série de barreaux aimantés, ce qu'on nomme des *faisceaux magnétiques*. La figure 348 montre comment on dispose alors ces faisceaux. On voit à l'Institut royal de Londres un faisceau magnétique formé de 450 lames dont chacune a 40 centimètres de longueur. Il est assez puissant pour porter 50 kilogrammes.


Fig. 348. — Faisceau magnétique formé de 12 barreaux aimantés.

La forme influe aussi sur la force magnétique: ainsi, à poids égal, une aiguille aimantée en forme de losange est plus puissante qu'un barreau rectangulaire.

La trempe de l'acier a une grande influence sur la vertu magnétique du barreau aimanté : l'acier trempé s'aimante

plus énergiquement que l'acier non trempé, et si on le recuit à des températures croissantes, la force magnétique s'affaiblit de plus en plus. Coulomb a constaté que le résultat est tout différent, si, au lieu d'opérer sur des barreaux rectangulaires, on emploie des aiguilles minces et très-allongées : le recuit augmente leur force magnétique.

Enfin la température a aussi une grande influence sur la force des aimants. Chauffé au rouge, un barreau aimanté perd toute sa vertu magnétique, dont l'intensité va d'ailleurs en diminuant à mesure que la température s'élève, ainsi que l'a constaté Coulomb. Mais si les variations de chaleur ont lieu dans des limites resserrées, l'intensité magnétique ne varie que passagèrement : l'aimant reprend en se refroidissant la force que la chaleur lui avait fait perdre. Il s'agit ici du magnétisme polaire, c'est-à-dire de celui que possèdent les aimants ; mais il en est de même des substances simplement magnétiques, comme le fer doux, le nickel, etc., qui perdent aussi leur propriété, quand on porte leur température à certains degrés. Le fer n'est plus magnétique, si on le chauffe au rouge cerise. Il en est de même de la fonte chauffée au rouge blanc. Au-dessus de 350°, le nickel n'est plus magnétique, et le manganèse ne le devient qu'au-dessous de zéro, vers — 20°. Ces derniers résultats sont dus à M. Pouillet.

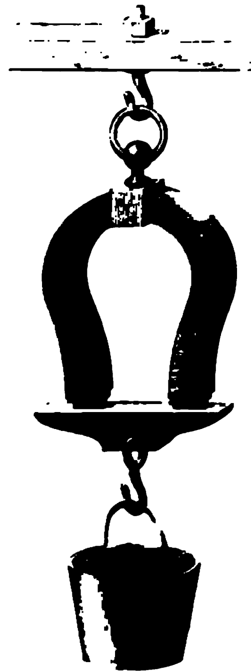


Fig. 3[illegible]. — Aimant en fer à cheval avec son armature et sa charge.

Il nous reste à dire quels moyens on emploie, pour conserver aux aimants naturels ou artificiels leur force magnétique. L'expérience a prouvé que les barreaux aimantés, réunis parallèlement deux par deux dans une boîte, de manière que les pôles opposés soient tournés du même côté, conservent leur aimantation, si l'on a soin de joindre les pôles

contraires par des barreaux en fer doux, qu'on nomme alors *armatures*, *armures*, ou *contacts*.



Fig. 350. — Aimant formé de deux faisceaux magnétiques.

On emploie les armatures pour augmenter la puissance d'un aimant. On le courbe alors en forme de fer à cheval, de sorte que l'armature réunit les deux pôles. Un aimant armé de cette façon (fig. 349) porte un poids supérieur, non-seulement à celui que pourrait porter un seul pôle, mais au double de ce dernier poids. En réunissant deux aimants rectangulaires ou faisceaux magnétiques, tournés de façon que leurs pôles opposés A, B, soient joints par une même armature (fig. 350), on obtient un aimant plus énergique. L'expérience prouve aussi que les aimants ainsi disposés



Fig. 351. — Aimant naturel muni de ses armatures.

conservent mieux leur force magnétique, si on les laisse armés de leurs contacts, ou si on y suspend la charge de fer qu'ils

sont susceptibles de porter, pourvu toutefois qu'on ait soin de ne pas dépasser cette limite ; car alors, le portant venant à se détacher brusquement, la force magnétique de l'aimant se trouverait affaiblie.

Les masses d'oxyde de fer magnétique, qui constituent les aimants naturels, n'ont le plus souvent qu'une aimantation peu énergique ; mais on parvient à accroître leur vertu magnétique en les garnissant de pièces de fer doux convenablement disposées. La figure 351 montre comment on dispose ces armatures : *m m'*, sont des plaques de fer doux qu'on applique contre les pôles naturels, et qui sont terminées par des masses *p p'* plus épaisses, formant alors les véritables pôles de l'aimant ; C est le contact ou le portant. Enfin d'autres plaques en cuivre réunissent et maintiennent les plaques de fer doux autour de la masse d'oxyde magnétique.

CHAPITRE II.

L'ÉLECTRICITÉ.

§ I. PHÉNOMÈNES D'ATTRACTION ET DE RÉPULSION ÉLECTRIQUES.

Les anciens connaissaient la propriété qu'acquiert l'ambre jaune, quand on frotte vivement un morceau de cette substance avec une étoffe de laine : en approchant la partie frottée de petits corps légers, tels que des brins de paille, des fragments de papier, des barbes de plume, on voit ceux-ci se mouvoir vers l'ambre, comme attirés par une force mystérieuse. Thalès de Milet, qui vivait 600 ans avant l'ère vulgaire, fait mention de cette propriété; et le philosophe grec Théophraste cite le jais ou jayet comme la possédant pareillement. Mais c'est à ces deux seuls faits que se bornèrent, pendant plus de deux mille ans, les connaissances des physiciens sur cet ordre de phénomènes. Pline le naturaliste, en mentionnant le premier fait, se borne à dire que « le frottement donne à l'ambre la chaleur et la vie. »

C'est seulement vers l'an 1600 qu'un médecin anglais, William Gilbert, à qui la science doit plusieurs découvertes sur les propriétés de l'aimant, reconnut dans le verre, le soufre, les résines, et diverses pierres précieuses, la propriété attractive de l'ambre. Depuis cette époque, un grand nombre de physiciens étendirent les découvertes de Gilbert, mirent au iour une multitude de phénomènes des plus curieux, jusqu'alors entièrement ignorés, et contribuèrent ainsi à fonder cette branche de la physique qui, sous le nom d'*électricité*, a

pris de nos jours tant d'extension et d'importance. Cet mot d'*électricité* désigne plus particulièrement la cause, aujourd'hui encore inconnue, des phénomènes que nous allons décrire : il est tiré du nom grec de l'ambre jaune, *électron* (ἤλεκτρον)[1].

Rien n'est plus facile que de produire les phénomènes d'attractions dont nous venons de parler. On prend un bâton d'ambre, de résine ou de verre, et on le frotte vivement



Fig. 352. — Attraction des corps légers.

avec un morceau de drap. Si alors on présente les parties frottées à des fragments de paille ou de papier, distants du bâton de quelques centimètres, on voit ces fragments s'approcher de la surface du verre, à peu près comme la limaille de fer est attirée par l'aimant; mais dès qu'il y a eu contact, l'attraction se change en répulsion, et les corps légers s'éloignent. Quand on promène le bâton frotté à une faible distance du visage, on éprouve une sensation pareille à celle que donne le frôle-

1. L'ambre jaune ou succin est une sorte de *résine* fossile qu'on trouve en grande abondance sur les *côtes* de la mer Baltique. Pendant longtemps, on l'employa, à cause de la beauté de sa couleur et de sa transparence, comme objet d'ornement dans les parures et les bijoux de luxe.

ment d'une toile d'araignée. Si le bâton de résine est un peu volumineux, et que le frottement soit énergique et prolongé, en approchant le doigt presque au contact, on entendra un pétillement sec; et, dans l'obscurité, on verra une étincelle jaillir entre le doigt et la partie la plus voisine du bâton. Tous ces phénomènes cessent, si l'on vient à passer la main sur les parties frottées.

Un corps est dit *électrisé*, tant qu'il manifeste, à un degré quelconque, les propriétés signalées dans ces expériences; il est à l'*état naturel*, quand il ne donne aucun signe d'attraction ni de répulsion.

Pendant longtemps, on crut que les corps devaient être rangés en deux classes distinctes, l'une comprenant tous ceux qui sont susceptibles de s'électriser par le frottement, l'autre ceux qui ne peuvent acquérir cette propriété. On avait, en effet, reconnu, en répétant les expériences précédentes avec des substances de toute nature, que les métaux, les pierres, les matières végétales et animales, le corps humain, par exemple, ne donnent pas lieu aux mêmes phénomènes que l'ambre, les résines, le verre, le soufre, etc. Mais un physicien du dernier siècle, Gray, découvrit la cause de cette différence, et démontra qu'elle tenait seulement aux conditions particulières où les expériences étaient effectuées.

En effet, ayant frotté un tube de verre fermé par un bouchon de liége, il s'aperçut que le bouchon était lui-même électrisé, bien que le liége frotté isolément ne donnât aucun signe d'électrisation. Gray étudia cette transmission de l'électricité, et prouva qu'elle se faisait à une grande distance, par l'intermédiaire même des corps qui, jusqu'alors, étaient considérés comme ne pouvant s'électriser par le frottement. Au contraire, cette transmission ne peut se faire par les substances susceptibles de s'électriser directement dans les conditions adoptées jusque-là. Il résulta de ces expériences nouvelles, que les diverses substances possèdent, à des degrés différents, la propriété de conduire l'électricité une fois développée : les corps

considérés auparavant comme seuls susceptibles de s'électriser par le frottement, sont précisément ceux qui conduisent le plus mal l'électricité; ce sont les *mauvais conducteurs*. Ceux, au contraire, qu'on n'avait pu d'abord électriser sont les *bons conducteurs*.

Les conséquences de cette nouvelle distinction sont importantes; et nous allons voir qu'elles sont justifiées par l'expérience. Le verre, l'ambre, la résine, etc., étant des corps mauvais conducteurs, l'électricité ne doit se développer que dans les parties frottées, et c'est aussi ce que l'observation constate. Mais si on les touche avec la main, qui est, comme tout le reste du corps, un bon conducteur, l'électricité se répand dans ce dernier, puis dans le sol, et disparaît; seulement toutefois aux points où le contact a eu lieu. Nous avons vu qu'elle disparaît totalement, si l'on passe la main sur toute la surface du bâton électrisé. Quand on frotte un cylindre métallique, on comprend qu'aucun signe d'électricité ne se manifeste; et, en effet, les métaux étant d'excellents conducteurs, s'il y a de l'électricité produite, elle se répand instantanément sur toute la surface du métal, et par l'intermédiaire du corps de l'opérateur, dans le sol. Ce qui le prouve, c'est que si l'on adapte au cylindre métallique un manche formé d'un corps mauvais conducteur, en verre par exemple, et si l'on tient ce manche d'une main, pendant que de l'autre on frotte le métal, celui-ci s'électrise et acquiert les propriétés que nous avons décrites plus haut comme appartenant au verre, à la résine, à l'ambre. C'est pour cette raison qu'on donne le nom de *corps isolants* aux substances qui conduisent mal l'électricité. En isolant un corps quelconque, on reconnaît qu'il est susceptible de s'électriser par le frottement.

On peut répéter, sous une multitude de formes, ces dernières expériences. Une personne que l'on fait monter sur un tabouret soutenu par des pieds de verre, s'électrise quand on la frappe avec une peau de chat : en approchant le doigt d'une partie quelconque de son corps, on peut en tirer des étincelles,

et pendant tout le temps que dure l'électrisation, elle éprouve elle-même sur le visage la sensation singulière que cause l'approche d'un bâton électrisé.

L'eau est un corps bon conducteur. A l'état de vapeur, elle possède la même propriété. Voilà pourquoi on doit avoir grand soin, quand on cherche à développer l'électricité sur un corps, non-seulement de l'isoler s'il est bon conducteur, mais d'essuyer et de sécher le manche ou les supports de verre, ou de tout autre isolant. Voilà pourquoi, aussi, l'électricité se produit avec plus de facilité par les temps secs que par les temps humides : la chambre où l'on opère doit donc, autant que possible, avoir été préalablement desséchée, de sorte que l'air qu'elle contient ne renferme que très-peu de vapeur d'eau. Pour éviter la déperdition de l'électricité par les supports isolants en verre, qui sont généralement employés, on les recouvre d'une couche de vernis à la gomme laque, dont la surface n'est pas hygrométrique comme celle du verre.

En résumé, les diverses substances peuvent être rangées d'après leur ordre de conductibilité en deux classes, celle des bons et celle des mauvais conducteurs ou isolants; mais dans chacune d'elles, la propriété conductrice affecte des degrés différents, de sorte qu'aucune substance n'en est absolument dépourvue. Le tableau suivant en donne un certain nombre rangés dans l'ordre de leur conductibilité décroissante :

Corps bons conducteurs.	Corps mauvais conducteurs ou isolants.
Les métaux.	Glace.
Charbon calciné.	Phosphore.
Graphite.	Caoutchouc.
Eau acidulée.	Porcelaine.
Minerais.	Air sec.
Eau.	Soie.
Substances végétales.	Verre.
Substances animales.	Soufre.
Vapeur d'eau.	Résine.
Verre en poudre.	Ambre.
Fleur de soufre.	Gomme laque.

On voit, par ce tableau même, que la conductibilité élec-

trique ne tient pas seulement à la nature chimique de la substance, mais aussi à son état physique, ou à sa structure moléculaire. Ainsi la glace est au nombre des isolants, tandis que l'eau et la vapeur d'eau sont dans les conducteurs. Le soufre et le verre, pris en masses compactes, sont mauvais conducteurs : réduits en poudre très-fine, ils conduisent bien l'électricité. Le charbon à son état ordinaire est isolant ; il devient conducteur quand il est calciné : cristallisé ou à l'état de diamant, il

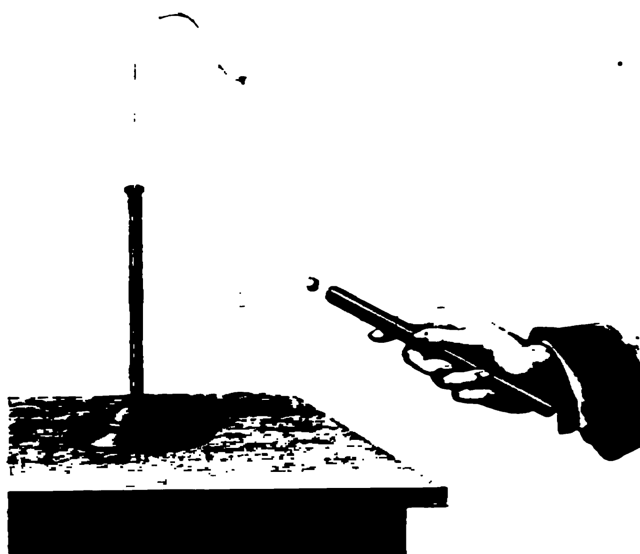


Fig. 353. — Pendule électrique. Phénomènes d'attraction et de répulsion.

est mauvais conducteur ; enfin le graphite, qui est une autre forme minéralogique du carbone, est un bon conducteur.

La chaleur a une grande influence sur la conductibilité électrique des corps ; une haute température donne cette propriété à plusieurs corps, qui sont isolants à la température ordinaire. le verre, le soufre, la gomme laque, les gaz sont dans ce cas.

Revenons maintenant aux phénomènes d'attraction et de répulsion électriques, et étudions-les avec plus de détails.

Nous nous servirons pour cela d'un appareil fort simple, auquel on donne le nom de pendule électrique (fig. 353). C'est une petite balle de moelle de sureau, suspendue par un

fil de soie à un support, et par conséquent isolée, puisque la soie est un corps mauvais conducteur.

En approchant de la balle un cylindre de résine électrisé, nous savons qu'il y aura d'abord attraction. Mais aussitôt que le contact aura eu lieu, la balle s'éloignera de la résine : elle sera repoussée, alors même que le bâton de résine en serait approché de nouveau. En cet état, la balle de sureau est électrisée, ce qu'il est facile de constater en lui présentant le doigt, car alors elle est attirée ; ou en la touchant avec la main, car après ce contact, elle n'est plus ni attirée par le doigt, ni repoussée par le bâton de résine : l'électricité qu'elle possédait s'est écoulée dans le sol par le corps de l'opérateur. Si, au lieu de se servir d'un bâton de résine, on emploie un cylindre de verre électrisé, les mêmes phénomènes se manifestent dans l'ordre où nous venons de les décrire : il y a attraction et contact, puis répulsion. Jusque-là, rien ne montre une différence entre l'électricité développée sur la résine et celle obtenue sur le verre, quand on frotte ces deux corps avec une étoffe de laine. Mais supposons qu'après avoir obtenu la répulsion de la balle de sureau à l'aide de la résine électrisée, on en approche un bâton de verre aussi électrisé. Alors a lieu une attraction de la balle au verre, attraction qui est même plus vive que si, au lieu d'avoir été préalablement électrisée par la résine, elle était restée à l'état naturel. Le même phénomène d'attraction se manifestera, si, après avoir électrisé la balle au contact du verre, on lui présente un morceau de résine électrisé.

Ainsi l'électricité développée sur la résine et celle développée sur le verre par le frottement de la laine se comportent, dans les mêmes circonstances, d'une façon opposée : l'une attire le corps électrisé que l'autre repousse, et réciproquement. De là, la distinction de deux espèces d'électricité, qui ont reçu des premiers observateurs les noms d'*électricité résineuse* et d'*électricité vitrée*. En répétant l'expérience précédente avec l'ambre, le soufre, la cire, le papier, la soie, etc...., on recon-

naît que ces substances se comportent, les unes comme la résine, les autres comme le verre ; et l'on dit alors qu'elles sont chargées, soit d'électricité résineuse, soit d'électricité vitrée.

Ces deux dénominations sont du reste abandonnées aujourd'hui, et voici pourquoi. Tous les corps étant susceptibles, comme nous venons de le voir, de s'électriser par le frottement, il est clair que si l'un des deux corps frotté s'électrise, l'autre doit s'électriser aussi : c'est ce que l'expérience a confirmé. Mais elle a fait voir, en outre, que l'électricité développée sur l'un des corps n'est pas la même que celle développée sur l'autre. Par exemple, si l'on prend deux disques, l'un de verre poli, l'autre de métal recouvert de drap, et munis chacun d'un manche isolant; si, après les avoir frottés l'un contre l'autre, on les sépare brusquement, le disque de verre se trouvera chargé d'électricité vitrée, le drap d'électricité résineuse : on s'en assure aisément, en voyant quelle action chacun d'eux exerce sur un pendule électrique dont la balle a été préalablement électrisée. Ce n'est pas tout. On s'est aperçu que la nature de l'électricité développée sur un corps change, selon le corps avec lequel il est frotté. Ainsi le verre, comme nous l'avons dit, prend l'électricité vitrée quand on le frotte avec la laine ; il prend au contraire l'électricité résineuse, si c'est une peau de chat qu'on emploie. La gomme laque se charge d'électricité résineuse, si on la frotte avec une peau de chat ou de la laine ; elle prend l'électricité vitrée, si elle est frottée avec un morceau de verre dépoli. En conservant les dénominations dont nous venons de nous servir un instant, on avait donc à craindre une certaine confusion : cette raison a fait peu à peu substituer les noms d'*électricité positive* et d'*électricité négative* à ceux d'électricité vitrée et d'électricité résineuse. Il ne faut pas, du reste, attacher à ces mots d'autre signification que celle-ci : l'électricité positive est celle qu'on développe sur le verre en le frottant avec de la laine ; l'électricité négative celle qu'on obtient sur la résine en la frottant avec la même substance. Mais le mode d'action de ces deux espèces d'élec-

tricité peut se résumer en deux lois d'une grande simplicité :

Tout corps électrisé, soit positivement, soit négativement, attire les corps légers à l'état naturel ;

Deux corps chargés d'électricités de noms contraires s'attirent ; deux corps chargés d'électricités de même nom se repoussent.

Ces lois ne souffrent pas d'exception ; mais les conditions de production de l'une ou de l'autre espèce d'électricité sont extrêmement complexes. La même substance, nous venons de le voir, s'électrise tantôt positivement, tantôt négativement selon la substance avec laquelle elle est frottée. Mais des modifications, souvent très-peu apparentes, dans la surface du corps changent la nature de l'électricité développée. Ainsi le verre poli et le verre dépoli, tous deux frottés avec la laine, prennent, le premier l'électricité positive, le second l'électricité négative. Deux disques de verre semblables, frotté l'un contre l'autre, s'électrisent tantôt d'une façon, tantôt de l'autre. La chaleur a une grande influence ; la plupart des substances chauffées prennent l'électricité négative.

On a fait une foule d'expériences curieuses sur les conditions qui déterminent l'un ou l'autre mode d'électrisation ; mais on sait peu de chose encore sur les causes de ces singuliers phénomènes, et les théories qu'on a imaginées pour les expliquer n'ont guère d'autre avantage que de coordonner tous les faits et de les rendre plus aisés à fixer dans la mémoire.

On peut électriser un corps isolant, ou un corps conducteur isolé, soit par le frottement, soit par le contact d'un autre corps déjà électrisé. Nous verrons bientôt même un autre mode d'électrisation, celui qui consiste à développer l'électricité à distance, par influence ou par induction. Dans tous ces cas, il est intéressant de savoir comment l'électricité se distribue dans un corps, si elle se répand dans la masse entière ou seulement à la surface, si, dans tous les points où sa présence se manifeste,

elle le fait avec plus ou moins d'énergie, en un mot quelle est sa tension dans les différentes parties d'un corps de forme quelconque.

Un premier fait, que l'expérience nous a déjà révélé, est celui-ci : dans un corps isolant l'électricité est localisée aux points de la surface qui ont été frottés, ou qu'on a mis en contact avec un autre corps électrisé. Cela est vrai des isolants les plus parfaits; dans les corps moins mauvais conducteurs, l'électricité se répand à une petite distance autour des points dont nous parlons. La raison de ce fait est évidemment la même que celle qui fait de ces corps de mauvais conducteurs de l'électricité. Dans les bons conducteurs au contraire, l'électricité, quel que soit le mode de production, se répand presque instantanément sur toute la surface. Des expériences que nous allons décrire prouvent qu'elle ne pénètre pas dans la masse du corps, ou du moins que l'épaisseur de la couche électrisée est très-petite.



Fig. 354. — Distribution de l'électricité à la surface des corps conducteurs.

Une sphère métallique isolée sur un pied de verre est recou-

verte de deux minces calottes hémisphériques, qu'on maintient en contact avec elle à l'aide de deux manches isolants. On électrise alors le système entier ; puis on retire vivement et à la fois les deux hémisphères (fig. 354). En présentant séparément à la balle d'un pendule électrique la sphère elle-même, puis chacune des calottes, on reconnaît que ces dernières sont seules électrisées. L'électricité ne s'était donc point répandue dans une épaisseur plus grande que celle des enveloppes.



Fig. 355. — Distribution de l'électricité à la surface des corps.

Une sphère creuse métallique, percée d'un orifice à sa partie supérieure et isolée sur un pied (fig. 355), est chargée d'électricité. Pour reconnaître la façon dont cette électricité est distribuée, on se sert d'un petit disque de papier doré muni d'un manche isolant — c'est ce qu'on nomme un *plan d'épreuve* — et on l'applique sur un point quelconque de la surface extérieure de la sphère électrisée : on trouve alors qu'il attire la balle de sureau du pendule électrique. On touche le plan d'épreuve avec la main ; l'électricité dont il est chargé s'écoule, et il revient à l'état naturel. Si alors on l'applique à

l'intérieur de la sphère, en ayant soin qu'il ne heurte pas les bords du trou, on constate qu'il ne donne aucun signe d'électricité. Le résultat serait le même, si l'on commençait par éprouver l'intérieur de la sphère. Faraday faisait la même expérience en donnant au corps la forme d'un cylindre en treillis métallique qu'il posait sur un disque de laiton isolé. Il électrisait le disque, et constatait à l'aide du plan d'épreuve que la surface extérieure seule de cette espèce de vase était électrisée.

C'est aussi le même illustre physicien qui a imaginé l'expé-



Fig. 356. — Expérience de Faraday prouvant que l'électricité se répand à la surface extérieure des corps.

rience de la poche conique de mousseline, attachée à un cercle de métal isolé qu'on électrise. Un double fil de soie, fixé au sommet du cône, permet de retourner le sac, et l'on trouve toujours que c'est sur la surface extérieure que l'électricité s'est répandue, de sorte qu'elle passe alternativement d'une face de l'étoffe sur l'autre (fig. 356).

Ainsi, c'est bien à la surface extérieure des corps conducteurs que l'électricité se trouve distribuée : ou du moins, si elle pénètre dans l'intérieur, l'épaisseur de la couche électrisée est extrêmement faible. On prend deux sphères, l'une pleine et métallique, l'autre en gomme laque et dorée à la surface, toutes deux de même diamètre ; puis, on électrise la première et l'on mesure la tension électrique, à l'aide d'un instrument

spécial qu'on nomme *électromètre*. Si l'on met alors les sphères en contact, on trouve que la tension électrique est, sur chacune d'elles, moitié de ce qu'elle était d'abord sur la sphère métallique. Comme l'épaisseur de la couche électrique est, sur la sphère de gomme laque, égale à celle de la feuille d'or, on en conclut que cette épaisseur n'est pas plus grande sur la sphère massive.

§ II. LOIS DES ATTRACTIONS ET RÉPULSIONS ÉLECTRIQUES. — DISTRIBUTION DE L'ÉLECTRICITÉ A LA SURFACE DES CORPS.

Nous venons de parler de la *tension électrique*. C'est l'intensité de la force avec laquelle la portion considérée de la surface du corps électrisé attire ou repousse un corps électrisé extérieur. Coulomb a construit, sous le nom de *balance électrique*, un appareil qui sert à mesurer cette tension, et à l'aide duquel il a démontré suivant quelles lois varient les attractions et les répulsions électriques. Le principe de cet appareil et le mode d'observation étant les mêmes que ceux de la *Balance magnétique*, décrite dans le livre précédent, nous nous contenterons de donner l'énoncé de ces lois :

La répulsion ou l'attraction de deux sphères égales, chargées d'électricités de même nom ou de noms contraires, varie en raison inverse du carré de leurs distances ;

Les forces attractives ou répulsives varient comme les produits des quantités d'électricité que contiennent les deux sphères.

C'est, on le voit, la même formule que pour la gravitation universelle.

La tension de l'électricité répandue à la surface d'un corps conducteur n'est la même en tous les points de la surface, que si le corps a la forme d'une sphère. C'est ce qu'on exprime en disant que l'épaisseur de la couche électrique y est uniforme (fig. 357). Dans un ellipsoïde allongé, cette couche est maximum aux extrémités du grand axe ; dans un ellipsoïde

aplati, elle est maximum sur toute la circonférence de l'équateur. Dans un disque plat, la tension électrique, presque nulle au centre, va en croissant vers les bords, où elle atteint la plus grande intensité. Dans un conducteur qui a la forme d'un cylindre terminé par deux hémisphères, c'est à la surface de ces derniers que la tension est la plus grande; elle est presque nulle partout ailleurs. Les lignes ponctuées, qui



Fig. 357. — Tension de l'électricité aux différents points de la surface d'une sphère; d'un ellipsoïde.

entourent les solides représentés dans les figures 357 et 358, indiquent, par leurs distances plus ou moins grandes aux points voisins des surfaces, quelle est la tension électrique en chacun de ces points.

On voit donc combien la forme des corps a d'influence sur la distribution de l'électricité à leur surface. Mais nulle part cette influence n'est plus sensible que sur les parties des corps terminées par des arêtes vives, des angles aigus, des pointes coniques ou pyramidales. Dans ces parties, l'électricité s'accumule et acquiert une intensité assez grande pour s'écouler dans le milieu ambiant, alors même que ce milieu est très-peu conducteur. Avant de vérifier par l'expérience ce qu'on nomme le *pouvoir des pointes*, disons un mot de l'influence du milieu qui environne un corps électrisé, sur la conservation ou la déperdition de l'électricité à sa surface.



Fig. 358. — Tension de l'électricité sur un disque plat; sur un cylindre terminé par des hémisphères.

Nous savons déjà que, si ce milieu est bon conducteur,

comme l'eau ou l'air chargé d'humidité, l'électricité s'écoulera et ne pourra séjourner sur le corps qu'on a électrisé : c'est un obstacle qu'il faut écarter, quand on veut obtenir une quantité d'électricité tant soit peu sensible. Mais supposons que le milieu soit de l'air sec : quelle sera l'influence de la pression atmosphérique sur la déperdition de l'électricité à la surface du corps? quelle sera l'influence de la température? Ces questions sont très-complexes, parce que les causes qui agissent à la fois sur la déperdition dont il s'agit, outre qu'elles sont nombreuses, sont très-difficiles à étudier séparément : les supports isolants sont plus ou moins bons conducteurs ; il en est de même des corps électrisés, etc., etc. Coulomb et Matteucci ont étudié cette question intéressante et difficile, et sont arrivés à des résultats qui ne sont pas toujours concordants. Néanmoins, il résulte de leurs recherches, que la déperdition d'électricité dans l'air sec augmente avec la température; qu'à une même température, elle augmente rapidement quand la pression de l'air diminue, ou si l'on veut à mesure que l'air environnant le corps électrisé est raréfié. Toutefois, cette dernière loi n'est vraie que pour les fortes charges; de sorte que, si l'on introduit dans un espace vide d'air, un corps fortement électrisé, il commence par perdre instantanément une grande partie de sa tension, mais seulement jusqu'à une certaine limite; après quoi la déperdition se fait très-lentement. Plus la raréfaction est grande, plus la limite dont il s'agit est faible, mais aussi plus la perte électrique devient faible aussi. Plus tard nous décrirons de très-curieux phénomènes qui ont pour cause cette déperdition de l'électricité dans les milieux raréfiés.

Revenons à l'écoulement de l'électricité par les pointes.

On a calculé qu'au sommet d'une pointe conique, la tension électrique est infinie, de sorte qu'il doit être impossible de charger d'électricité un corps conducteur muni d'un tel prolongement; c'est ce que l'expérience confirme. A mesure que l'électricité se développe, elle s'écoule dans le milieu ambiant

et disparaît. Quand on examine l'extrémité de la pointe dans l'obscurité, on aperçoit une aigrette lumineuse dont nous étudierons plus loin la forme et la couleur. Si, pendant que la pointe est en communication avec la source électrique, on place la main en avant ou au-dessus, on sent un souffle qui indique un mouvement continu des particules d'air; on rend ce mouvement très-sensible en plaçant sur le prolongement de la pointe, la flamme d'une bougie (fig. 359). Le *vent électrique* est

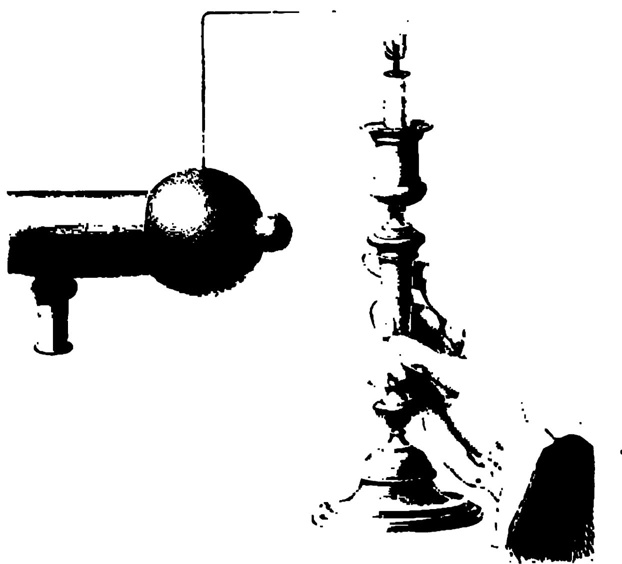


Fig. 359. — Pouvoir des pointes. Vent électrique.

assez intense pour courber la flamme ou même pour l'éteindre. Cette agitation de l'air, à l'extrémité des pointes des conducteurs électrisés, avait d'abord été attribuée à l'écoulement réel de l'électricité qu'on assimilait à un fluide; mais l'explication suivante nous semble préférable, parce qu'elle n'exige aucune hypothèse sur la nature de l'électricité, et d'ailleurs se trouve d'accord avec les phénomènes connus. Les molécules d'air qui se trouvent en contact avec la pointe, électrisée à une tension considérable, se chargent d'électricité de même nom que celle du conducteur. Dès lors, il y a répulsion, et les

molécules en s'éloignant, cèdent la place à d'autres qui s'électrisent à leur tour, et ainsi de suite. De là, le courant d'air que l'observation constate, courant qui n'est continu qu'autant que la charge électrique est sans cesse renouvelée.

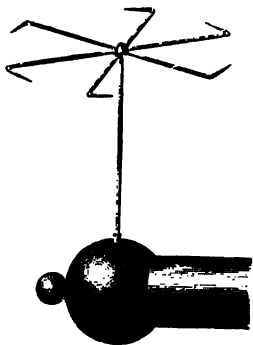


Fig. 360. — Tourniquet électrique.

La force avec laquelle l'air est chassé au-devant d'une pointe, engendre une réaction qui doit pousser la pointe en sens contraire; et si cette pointe ne se meut pas, c'est qu'elle n'est pas libre. L'existence de cette réaction est mise en évidence dans un petit appareil qu'on nomme le *tourniquet électrique* (fig. 360). Sur un support métallique, on place un système de rayons divergents réunis au centre par une chape qui permet le mouvement du système dans un plan horizontal. Chaque rayon est recourbé en pointe aiguë dans le même sens. Dès qu'on charge le conducteur sur lequel le tourniquet est placé, on voit celui-ci prendre un mouvement de rotation dans une direction opposée à celle des pointes.

CHAPITRE III.

LES MACHINES ÉLECTRIQUES.

§ I. ÉLECTRICITÉ DÉVELOPPÉE PAR INFLUENCE OU INDUCTION.

Quand un corps est à l'état naturel, nous venons de voir qu'il y a deux moyens de l'électriser : le frottement, ou le contact avec un corps préalablement électrisé. Les phénomènes que nous allons décrire maintenant prouvent que dans ce dernier cas le contact n'est pas nécessaire.

Prenons, en effet, un corps électrisé C; — c'est ici une sphère métallique montée sur une colonne de verre, — et plaçons dans son voisinage, à une distance suffisamment petite, un conducteur cylindrique AB, isolé, et à l'état naturel. Ces deux corps ne sont pas plutôt en présence, que le conducteur AB donne des signes manifestes d'électrisation. On peut s'en assurer en approchant de ses extrémités la balle de sureau d'un pendule électrique, et en constatant qu'elle est attirée par le conducteur; ou mieux en observant de petits pendules *a*, *b*, fixés en différents points du cylindre, et formés de balles de sureau suspendues à des fils conducteurs. Ces balles se trouvent chargées au contact de la même électricité que les points qu'elles touchent : de là, une répulsion qui se manifeste par la déviation de la verticale des fils des pendules. Ce mode de production de l'électricité, ainsi développée à distance par un corps électrisé sur un conducteur à l'état naturel, se nomme *électrisation par influence* ou *par induction*.

Voyons maintenant quelle est la nature de cette électricité,

et comment elle se trouve distribuée sur le corps électrisé par influence. Si la sphère C est chargée d'électricité *positive*, l'extrémité A du cylindre, la plus voisine de la sphère, est électrisée *négativement*, l'extrémité B l'est au contraire *positive-*

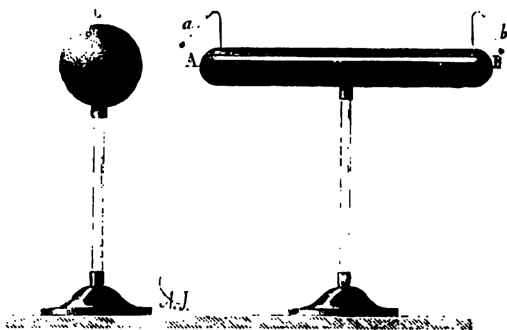


Fig. 361. — Électricité développée par influence ou induction.

ment. On s'assure de ce double fait, en présentant successivement aux deux extrémités un petit pendule isolé, dont la balle est chargée d'une électricité connue, d'électricité positive par exemple; approchée avec précaution de A, elle est attirée;

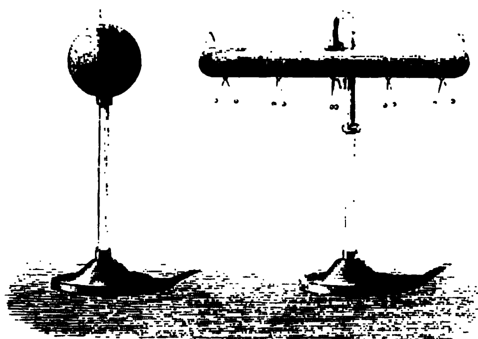


Fig. 362. — Distribution de l'électricité sur un conducteur isolé électrisé par influence.

de B, elle est repoussée. C'est l'inverse qui aurait lieu, si la sphère C eût été chargée d'électricité *négative*.

Pour étudier la distribution de ces deux électricités opposées sur le cylindre conducteur, on suspend à diverses distances des pendules doubles à fils conducteurs, et l'on observe la plus

ou moins grande divergence des balles. On trouve alors que la tension électrique est maximum à chaque extrémité, et qu'elle diminue progressivement de chacun de ces points extrêmes vers une région moyenne M, où elle est nulle, et que pour cette raison on nomme *ligne neutre*. Mais cette section du cylindre, qui se trouve ainsi restée à l'état naturel, est plus rapprochée de l'extrémité voisine de la sphère, que de l'autre : elle n'est pas au milieu du conducteur électrisé par influence. Ajoutons que la tension électrique est aussi plus grande en A qu'en B. Les choses étant en cet état, éloignons graduellement la sphère. On voit alors les balles des pendules se rapprocher peu à peu, et revenir au contact quand la distance est suffisamment grande. Alors toute influence cesse : le cylindre conducteur revient à l'état naturel ; il reprendrait aussi instantanément ce même état si, au lieu d'éloigner la sphère, on la déchargeait de son électricité, en la mettant en communication avec le sol.

Dans l'expérience que nous venons de décrire, le conducteur, électrisé par influence, était isolé. Supposons qu'après l'avoir mis en présence de la sphère *inductrice*, — c'est ainsi qu'on nomme le corps électrisé qui agit par influence, — on fasse communiquer avec le sol l'extrémité la plus éloignée. Aussitôt, toute l'électricité dont était chargée cette partie du cylindre disparaît, et ce dernier ne contient plus que l'électricité opposée à celle de la sphère, mais à une tension plus grande, comme le prouve l'écart plus considérable des pendules : le maximum de tension est toujours en A, et la ligne neutre a disparu. La nature de l'électricité restante, sa distribution sur le conducteur ou sa tension aux divers points seraient encore les mêmes, si, au lieu de le toucher en B, on avait fait communiquer avec le sol tout autre point du cylindre, même l'extrémité A. Enfin, si après avoir établi cette communication, on la supprime, tout reste encore dans le même état, c'est-à-dire que le conducteur est toujours chargé de l'électricité opposée à celle de la sphère inductrice, inégalement distribuée. En éloignant alors cette sphère, l'électricité reste sur le conduc-

teur ; seulement, elle se distribue également sur toutes les parties de sa surface, et l'on a un corps électrisé par influence et chargé d'électricité, comme s'il l'eût été directement par le frottement ou au contact.

Quand on met en présence d'une source telle que la sphère électrisée, non plus un seul conducteur, mais une série de conducteurs placés à la suite les uns des autres, AB, A'B', etc. (fig. 363), tous se trouvent simultanément électrisés par influence; mais la tension électrique sur chacun des cylindres va en diminuant avec la distance, bien qu'elle soit plus forte sur A'B' par exemple, qu'elle ne serait si, le conducteur AB

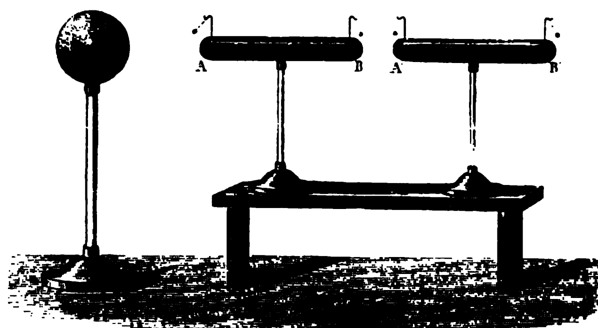


Fig. 363. — Électrisation par influence d'une série de conducteurs.

étant enlevé, l'influence n'était exercée que par la sphère inductrice. Cette dernière observation prouve que chaque conducteur agit par influence, et contribue à électriser celui qui le suit dans la série.

Les faits qui précèdent ont une grande importance. Ils ont suggéré une hypothèse qui, sans rien préjuger sur la nature de la cause première de l'électricité, permet d'expliquer plus complétement les phénomènes d'attraction et de répulsion, d'électrisation au contact, etc.... Voici quelle est cette hypothèse.

Un corps, à l'état naturel, renferme à la fois les deux espèces d'électricité, l'électricité pos'tive et l'électricité négative, en proportion telle qu'elles se neutralisent. Vient-on à le frotter à

l'aide d'un second corps, on détermine sur chacun d'eux une séparation des deux électricités : l'une d'elles passe sur l'un des corps frottés et l'autre sur l'autre, où, se trouvant de chaque côté en excès quand on éloigne les corps, elles manifestent leur présence par les phénomènes que nous avons décrits.

Voici maintenant comment s'explique l'électrisation par influence, c'est-à-dire les phénomènes que nous a présentés le cylindre conducteur placé dans le voisinage de la sphère électrisée. L'électricité positive de cette sphère attire l'électricité négative et repousse l'électricité positive du conducteur; la première se porte vers l'extrémité A (fig. 361), la seconde est refoulée vers l'extrémité B. Mais l'attraction est plus forte en A que la répulsion en B, parce que la distance à la source est moindre pour la première région que pour la seconde : voilà pourquoi la ligne neutre est plus rapprochée de A que de B. Quand on met le conducteur en communication avec le sol, c'est comme si on allongeait indéfiniment ce corps, ce qui explique l'accroissement de tension de l'électricité négative en A; la ligne neutre indéfiniment reculée n'est plus placée sur ce cylindre, de sorte que, si l'on rompt brusquement la communication, on ne trouve plus sur le cylindre que de l'électricité négative. Cette dernière se trouve d'ailleurs inégalement distribuée à la surface, à cause de l'inégalité d'action de la sphère sur des points qui sont situés à des distances croissantes.

La même hypothèse va nous rendre compte des premiers phénomènes que nous avons étudiés, c'est-à-dire de l'attraction et de la répulsion des corps légers par un corps électrisé.

Quand on approche la balle de sureau du pendule électrique d'un cylindre de verre C, chargé d'électricité positive, qu'arrive-t-il? L'électricité neutre de la balle est décomposée par influence, la positive est repoussée en *b*, si le fil est isolant, ou refoulée dans le sol s'il est conducteur; la négative est attirée en *a*. Dans les deux cas, la tendance à se rejoindre

de l'électricité positive de la balle et de l'électricité négative du bâton fait dévier le pendule de la verticale : il y a attraction. S'il y a contact, les électricités se combinent, et la balle reste chargée d'électricité négative, pourvu toutefois qu'elle soit isolée. De là, répulsion entre les deux électricités de même nature que contiennent en ce moment les deux corps en présence. Quand la balle n'est pas isolée, l'électricité positive est refoulée dans le sol, et le contact détermine la combinaison des deux électricités contraires; la balle revient à l'état naturel, et il n'y a pas de répulsion. Tous ces faits, nous l'avons vu dans le chapitre précédent, sont ceux que l'observation constate.

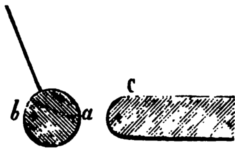


Fig. 364.—Cause de l'attraction des corps légers.

L'électrisation d'un corps conducteur isolé, par le contact d'un corps déjà électrisé, s'explique aussi aisément. Avant le contact, l'électricité neutre du conducteur est décomposée par influence : il y a attraction de l'électricité positive, par exemple, du corps préalablement électrisé, pour l'électricité négative du conducteur, et répulsion de l'électricité positive. Le contact détermine la combinaison, dans une certaine proportion, des électricités qui s'attirent, et il reste sur le conducteur un excès d'électricité positive. De là, une charge d'électricité de même nature que celle de la source électrique, ce qui fit croire d'abord que l'électrisation se faisait par une sorte d'écoulement de l'électricité qu'on assimilait à un fluide : et l'hypothèse paraissait d'autant mieux fondée que le contact diminuait la charge électrique de la source. En réalité, il n'y a pas de partage d'électricité entre les deux corps; mais bien une action de décomposition par influence, puis une combinaison partielle. Cette combinaison a lieu souvent à travers l'air un peu avant le contact, et elle est, comme nous l'avons vu, accompagnée d'une explosion et d'une étincelle.

Enfin, l'action des pointes trouve aussi dans l'hypothèse précédente une explication plus complète que celle que nous

avions vaguement indiquée plus haut. Quand on présente à un corps électrisé un conducteur terminé par une pointe, l'électricité neutre de ce conducteur est décomposée par influence; et comme l'électricité opposée à celle du corps électrisé possède à l'extrémité de la pointe une tension infinie, il se fait une combinaison rapide des deux électricités de noms contraires : le corps électrisé se trouve déchargé.

§ II. ÉLECTROSCOPES.

On donne le nom d'*électroscopes* à des appareils qui servent à constater la présence de l'électricité libre développée sur un corps, et même à en apprécier la tension.

Le pendule électrique, que nous n'avons plus à décrire, est un électroscope, et nous avons eu l'occasion d'indiquer plusieurs de ses usages.

L'électroscope à cadran est représenté dans la figure 365. Il est formé d'un support conducteur, surmonté d'un cadran en ivoire. Au cendre du cadran, se trouve suspendue la tige d'un pendule à balle de sureau, tige très-mince également en ivoire. Quand on place cet appareil sur un corps chargé d'électricité, celle-ci se répand sur toutes les parties de l'électroscope. La balle de sureau, d'abord en contact avec le support, est repoussée, et sa déviation d'avec la verticale est indiquée par les divisions du cadran, l'angle étant d'autant plus grand que la charge électrique du corps est plus considérable.

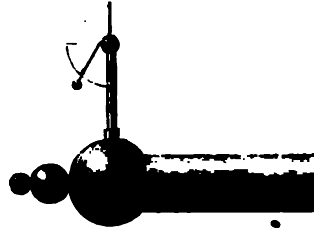


Fig 365. — Électroscope à cadran.

L'électroscope à feuilles d'or (fig. 366) se compose d'une cloche en verre posée sur une plaque de métal, à l'intérieur de laquelle pénètre une tige en laiton surmontée extérieurement d'une boule. La tige métallique supporte deux feuilles

d'or qui se maintiennent verticalement au contact, quand la charge électrique de l'appareil est nulle, et qui divergent dans le cas contraire. Voici comment on fait usage de l'électroscope à feuilles d'or, quand on veut reconnaître si un corps est ou non électrisé :

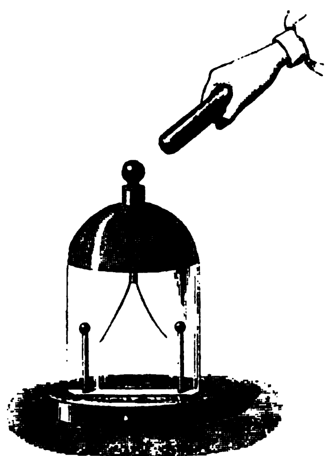


Fig. 366. — Électroscope à feuilles d'or.

On approche lentement le corps en question de la boule extérieure; s'il n'est pas chargé d'électricité, les feuilles se maintiennent au contact. S'il est au contraire électrisé, positivement par exemple, l'électricité neutre du système formé par le bouton, la tige métallique et les feuilles d'or, sera décomposée par influence, l'électricité négative attirée dans le bouton, l'électricité positive repoussée dans les feuilles; celles-ci s'écarteront donc alors l'une de l'autre, en formant entre elles un angle d'autant plns grand, que la charge électrique du corps est plus considérable. Qu'on vienne maintenant à toucher le bouton avec le doigt, et l'électricité de même nature que celle du corps inducteur s'écoulera dans le sol; c'est le fait que nous avons constaté plus haut en décrivant les phénomènes d'électrisation par influence. Les lames d'or se rapprocheront donc de la verticale, et le système sera chargé d'électricité négative principalement accumulée dans le bouton. Si on enlève le doigt, et en même temps le corps inducteur, cette même électricité négative se répandra dans le système, et fera de nouveau diverger les feuilles d'or. L'électroscope se trouve donc, par cette opération, chargé d'électricité, laquelle est toujours de nature contraire à celle du corps qu'on lui a présenté. En cet état, il peut servir à reconnaître quelle est la nature de cette électricité, au cas où elle serait ignorée. Voici comment on procède alors à cette détermination.

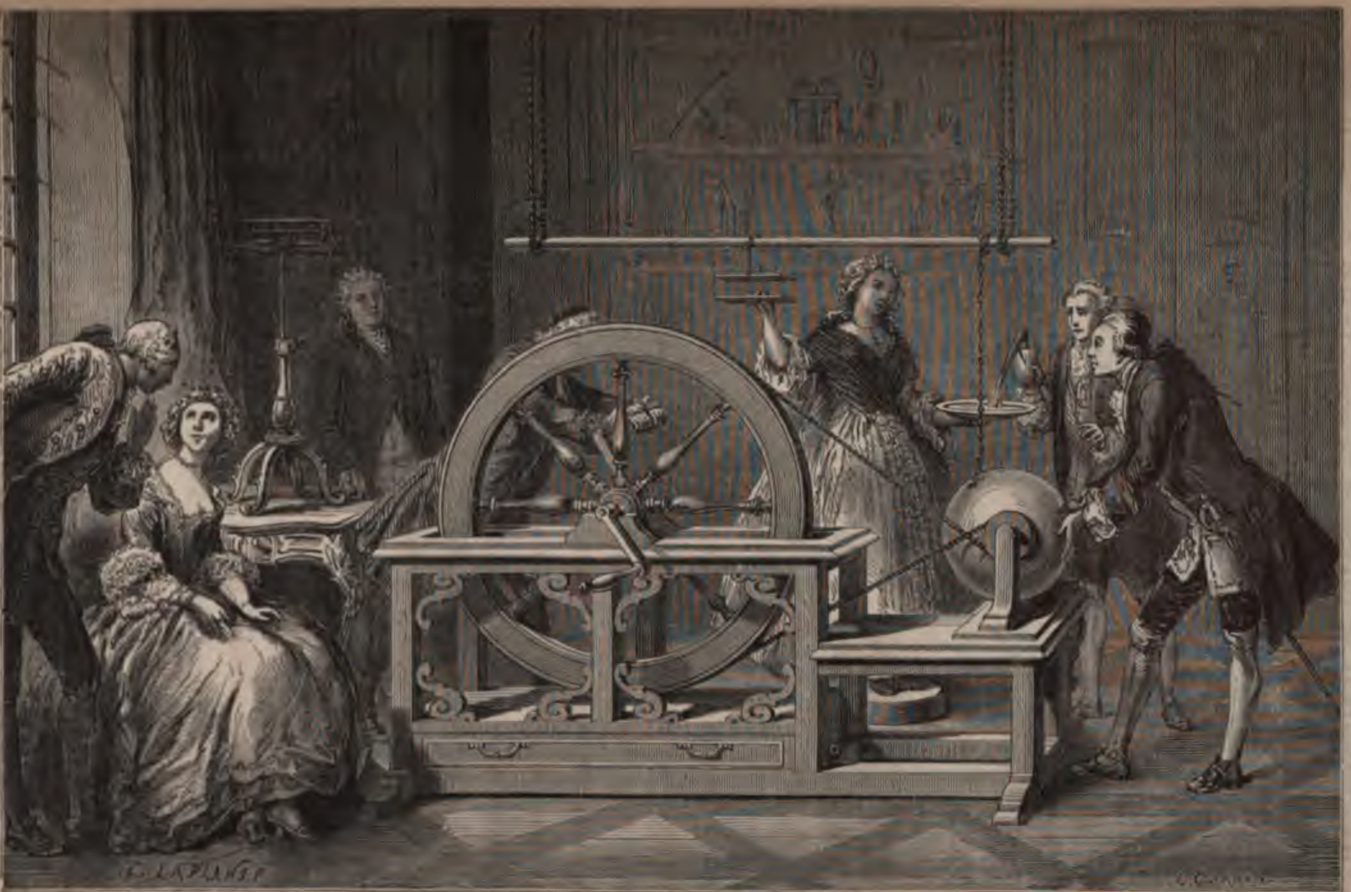


Fig. 367. — Machine électrique d'Otto de Guericke, à globe de soufre ou de résine.

On approche du bouton de l'instrument un corps chargé d'une électricité connue, par exemple un bâton de résine électrisé négativement. Dans le cas que nous avons supposé, c'est-à-dire les feuilles se trouvant chargées négativement, qu'arrivera-t-il? L'influence de l'électricité négative du bâton se manifestera par un accroissement de divergence des lames, l'électricité négative de la tige étant répoussée dans ces dernières, dont la tension se trouvera ainsi augmentée.

Si au lieu d'un bâton de résine, on eût pris un bâton de verre, électrisé positivement, les électricités contraires des lames d'or et du verre se seraient attirées; la divergence au lieu d'augmenter aurait diminué jusqu'au contact. Mais dans ce cas, il pourrait y avoir une cause d'erreur, en ce que les lames étant arrivées au contact, l'influence du bâton de verre peut déterminer une décomposition nouvelle, et dès lors une divergence des lames d'or. Il vaut donc mieux, quand il n'y a pas tout d'abord divergence, faire une seconde épreuve avec un corps chargé d'une électricité opposée.

Telles sont les épreuves à l'aide desquelles on peut reconnaître la nature de l'électricité d'un corps, quand c'est ce corps qui a servi à charger l'électroscope. Il est clair qu'on pourrait suivre une marche inverse, charger l'électroscope d'une électricité connue, et s'en servir pour reconnaître l'espèce d'électricité dont un autre corps est pourvu.

§ III. LES MACHINES ÉLECTRIQUES.

Nous savons maintenant comment, à l'aide d'un corps électrisé par le frottement, on peut en électriser un autre par influence. C'est donc le moment de décrire les principales machines imaginées pour recueillir des quantités plus ou moins considérables d'électricité positive et négative; la construction de ces machines étant basée, comme on va le voir, sur ces deux modes d'électrisation.

C'est à Otto de Guericke qu'est due l'invention de la pre mière machine électrique. Elle consistait essentiellement e un globe de soufre ou de résine monté sur un axe auquel o imprimait un mouvement rapide de rotation. En appuyaı les deux mains sur ce globe, il en résultait un frottement qı électrisait le corps non conducteur; et, pour recueillir l'élec tricité ainsi développée, on suspendait horizontalement au dessus du globe, à l'aide de cordons de soie, un cylindı métallique. Une des extrémités de ce cylindre affleurait l globe de soufre, ou encore, une chaîne de métal descenda du conducteur à une petite distance de la surface du glob L'électricité développée à la surface du soufre, décomposa par influence l'électricité neutre du conducteur isolé qui s trouvait ainsi chargé, à ses deux extrémités, d'électricit opposées. Nous avons reproduit, dans la figure 367, une ma chine électrique de ce genre, telle qu'on la construisait a milieu du dix-huitième siècle, à l'époque où l'abbé Noll répétait devant les gens du monde une multitude d'expé riences amusantes ou curieuses.

La machine électrique à plateau de verre est, de toı les appareils modernes de ce genre, la plus générale ment employée. La figure 368 va nous rendre sa descriptic facile.

Un grand plateau en verre de forme circulaire est mon verticalement sur un axe métallique, autour duquel on pe le faire tourner à l'aide d'une manivelle. En passant entre l deux montants en bois qui supportent l'axe du plateau, la suı face de ce dernier frotte contre deux systèmes de coussiı fixés aux montants. Le mouvement de rotation détermine doı l'électrisation du disque de verre, qui se charge d'électrici positive sur ses deux faces. Les coussins ne sont pas isolé afin que l'électricité négative dont ils se chargent puis s'écouler dans le sol; si cette électricité s'accumulait sur l coussins, il arriverait un moment où son influence sur l'éle

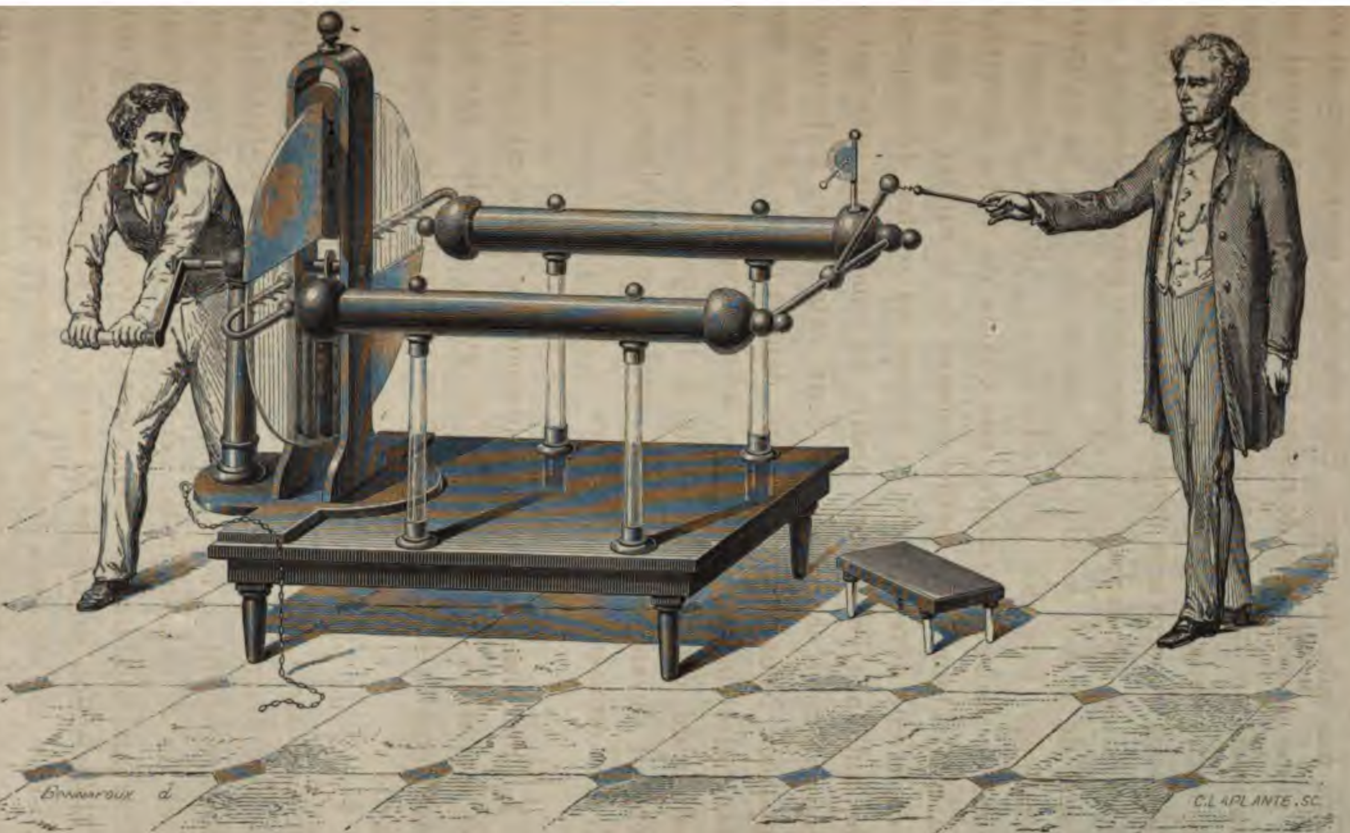


Fig. 368 — Machine électrique à plateau de verre.

tricité positive du verre, devenant égale à l'action due au frottement, limiterait nécessairement la charge du plateau; une chaîne métallique met donc les montants et les coussins en communication avec le sol. Chaque coussin est rembourré de crin, et recouvert d'une enveloppe de cuir, dont la surface est enduite d'or mussif ou d'un amalgame de zinc; l'expérience a prouvé que ces dernières substances ont une grande efficacité sur la production de l'électricité.

Telle est la disposition de la partie de la machine qui a pour objet le développement de l'électricité. Voici maintenant comment on s'en sert pour charger les *conducteurs*. On nomme ainsi deux longs cylindres en laiton, isolés sur des pieds de verre, terminés par des portions sphériques, et réunis entre eux par un cylindre transversal de plus petit diamètre. Les deux extrémités de ces cylindres voisines du plateau portent des mâchoires métalliques garnies de pointes, tournées vers le disque de verre, mais à une distance suffisante pour qu'il n'y ait pas contact pendant le mouvement de rotation. Voyons maintenant ce qui se passe, à mesure que le plateau de verre se charge d'électricité positive. Cette électricité agit par influence sur l'électricité neutre du conducteur, la décompose, attire l'électricité contraire, c'est-à-dire la négative, qui s'échappe par les pointes en neutralisant des quantités équivalentes de l'électricité positive du verre. L'électricité positive du conducteur est, au contraire, repoussée sur les deux cylindres métalliques où elle s'accumule. On voit sur l'un deux un électroscope à cadran, dont la pendule montre, par son écart, la tension de l'électricité recueillie. Le verre s'électrise à mesure qu'il vient frotter les coussins, mais il se décharge en passant devant les pointes des mâchoires : il n'y a donc à la fois que deux secteurs du cercle qui soient électrisés. Ce sont ceux-là qu'on voit, dans la figure, protégés par des écrans de taffetas ciré, qui empêchent la déperdition causée par l'humidité de l'air. Pour que la machine fonctionne bien, il faut d'ailleurs que l'air de la chambre où elle se trouve soit sec et à

une température suffisamment élevée : on essuie avec soin, avant l'opération, les supports en verre qui isolent les conducteurs.

Ramsden, constructeur anglais du dix-huitième siècle, est l'inventeur de la machine à plateau, dont la construction a été, du reste, perfectionnée depuis cette époque.

Avec la machine de Nairne (fig. 369), on obtient à la fois, mais sur deux conducteurs séparés, l'électricité positive et

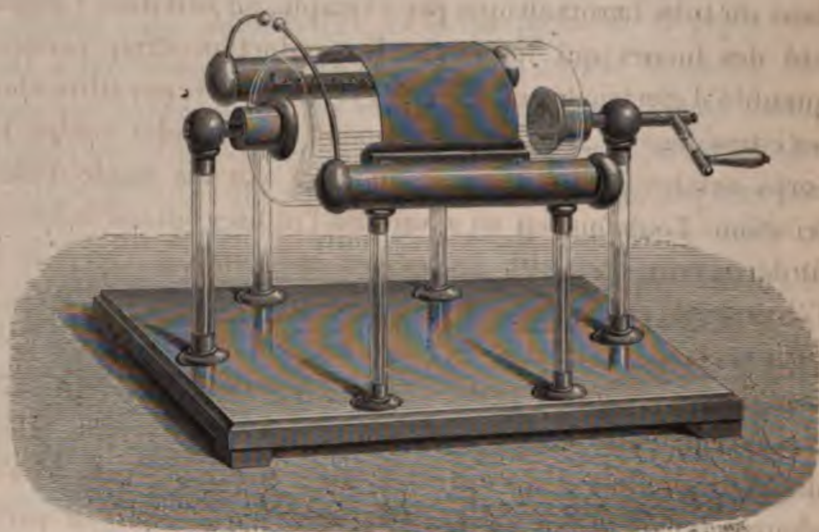


Fig. 369. — Machine de Nairne, fournissant les deux électricités.

l'électricité négative. L'un des conducteurs est muni de pointes : il s'électrise donc positivement comme ceux de la machine à plateau. L'autre conducteur porte le coussin dont le frottement, sur un grand cylindre de verre, détermine la séparation des deux électricités, formant l'électricité neutre du système : un pièce de taffetas protége d'ailleurs la surface du verre contre la déperdition de l'électricité développée. Il résulte de là que, pendant que l'électricité positive s'accumule sur le verre, la négative est repoussée dans le coussin et de là sur le conducteur. On peut ne conserver que l'une des deux électricités recueillies : il suffit pour cela de faire communi-

quer avec le sol, à l'aide d'une chaîne, le conducteur qui porte l'autre électricité.

Van Marum a imaginé une machine électrique qui peut fonctionner à volonté, soit comme celle de Ramsden, soit comme celle de Nairne : on peut recueillir sur ses conducteurs, soit de l'électricité positive, soit de l'électricité négative, ou encore l'une et l'autre à la fois.

Si l'on agite du mercure bien sec dans un tube de verre, dans un tube barométrique par exemple, on voit dans l'obscurité des lueurs qui indiquent la production d'une certaine quantité d'électricité ; et, en effet, le tube de verre attire alors les corps légers. Ainsi, le frottement des liquides contre les corps solides peut être aussi employé comme mode d'électrisation. Toutefois, on ne savait pas l'utiliser, quand le hasard fit découvrir, en 1840, un moyen très-efficace d'obtenir de l'électricité, par le frottement contre un solide, d'un jet de vapeur mélangé de gouttelettes liquides. Tel est le principe de la machine électrique d'Armstrong que représente la figure 370.

Une chaudière, isolée par des pieds de verre et remplie d'eau distillée, produit de la vapeur à haute pression ; celle-ci s'échappe dans l'air par une série de becs, après s'être en partie condensée dans son passage à travers une boîte d'eau pleine d'étoupes mouillées, qui imbibent constamment les tubes par où s'échappe la vapeur. Les gouttelettes liquides, produites par la condensation de la vapeur, frottent avec force contre une lame de buis qu'elles rencontrent avant de pénétrer dans les becs d'échappement, et aussi contre les parois de ceux-ci, formés du même bois. De l'électricité se dégage ainsi avec d'autant plus d'abondance, que la pression de la vapeur est plus élevée : la chaudière se charge d'électricité positive, la vapeur d'électricité négative. Pour recueillir cette dernière, on présente aux jets de vapeur un conducteur levé muni d'une série de pointes.

Les *machines hydro-électriques* ont une grande puissance : il est fâcheux que l'usage en soit peu commode. On cite, parmi

les machines de ce genre, celle de l'Institut polytechnique de Londres, munie de quarante-six jets de vapeur, et donnant des étincelles de soixante centimètres de longueur; celle de la Sorbonne, à Paris, qui porte quatre-vingts becs, et fournit aussi des étincelles continues de plusieurs décimètres de longueur.

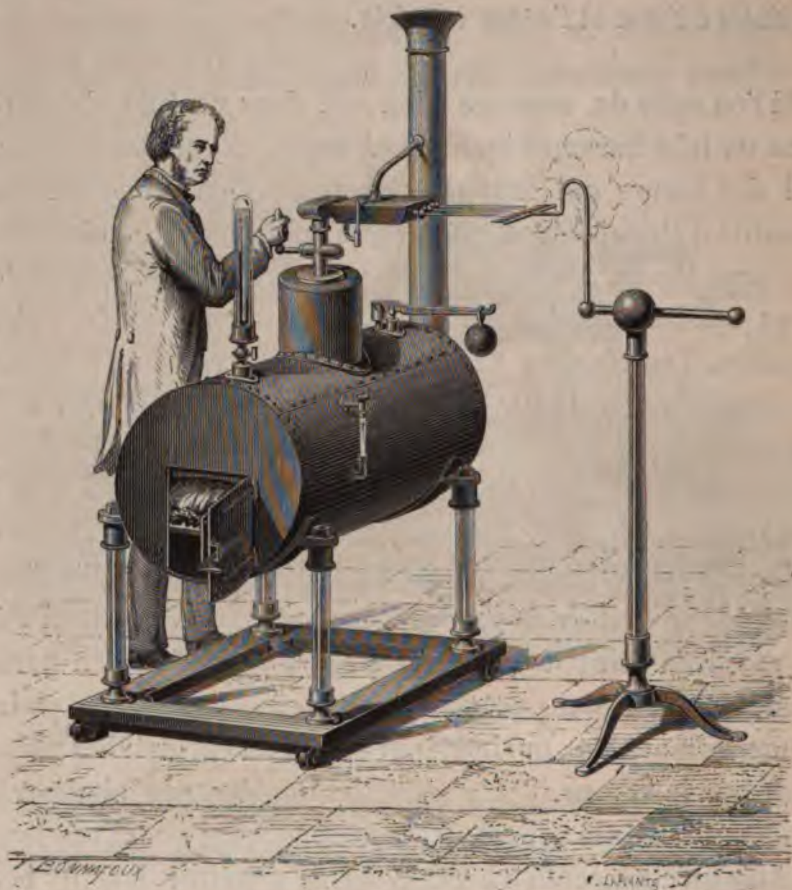


Fig. 370. — Machine hydro-électrique d'Armstrong.

On emploie souvent dans les cabinets de physique et dans les laboratoires de chimie, un appareil plus simple que ceux dont nous venons de donner la description, et propre à produire rapidement l'électricité dont on a besoin. C'est l'*électrophore* à gâteau de résine (fig. 371), de soufre ou de caoutchouc.

Il se compose d'un disque de résine par exemple, coulé

dans un moule de bois ou de laiton, et d'un plateau métallique à bords arrondis, muni d'un manche isolant en verre. On électrise la résine en la frottant obliquement avec une peau de chat; elle se charge ainsi d'électricité négative. On pose alors le plateau métallique sur le gâteau électrisé, et l'électricité neutre du métal est décomposée par influence, de sorte que la face inférieure, en contact avec la résine, s'électrise positi-



Fig. 371. — Électrophore à gâteau de résine.

vement, et la face supérieure négativement. En touchant la face supérieure avec le doigt, son électricité négative s'écoule dans le sol, et si alors on enlève le plateau métallique à l'aide du manche isolant, il reste chargé d'électricité positive, en assez grande quantité pour qu'on puisse en tirer une étincelle.

Il faut remarquer que l'électricité recueillie n'est pas donnée par le contact de la résine et du métal, contact qui n'a lieu d'ailleurs qu'en un petit nombre de points. Dès lors, le gâteau

de résine reste, après l'opération, chargé d'électricité négative, de sorte qu'on peut répéter plusieurs fois l'opération avec succès, et à de longs intervalles. Un électrophore, renfermé dans un lieu dont l'air est bien sec, conserve pendant des mois entiers l'électricité développée à sa surface par le frottement.

§ IV. EXPÉRIENCES ÉLECTRIQUES DIVERSES.

On fait dans les cours, à l'aide des machines que nous venons de décrire, des expériences fort curieuses, qu'on a multipliées sous les formes les plus diverses. Nous allons reproduire quelques-unes des plus intéressantes.

Une règle métallique est suspendue par une tringle de même nature, à l'un des conducteurs d'une machine électrique. Trois timbres sont suspendus à la règle, les deux extrêmes par deux chaînes de laiton, celui du milieu par un cordon de soie; le dernier communique, en outre, avec le sol, par une chaîne de métal. Enfin, entre les timbres, des fils de soie soutiennent deux petites balles métalliques (fig. 372). Aussitôt que la machine fonctionne, l'électricité du conducteur se répand sur les timbres extrêmes, et les balles isolées sont attirées, puis repoussées dès qu'il y a eu contact. Le timbre du milieu, qui est à l'état naturel ou neutre, étant soumis à l'influence des deux balles électrisées, se charge d'électricité de nature contraire à celle des balles, les attire jusqu'au contact, et les repousse à son tour. Il résulte de là une série de chocs successifs et dès lors de sons, qui se répètent tant que le conducteur de la machine est chargé. De là, le nom de *carillon électrique*, donné à l'appareil.

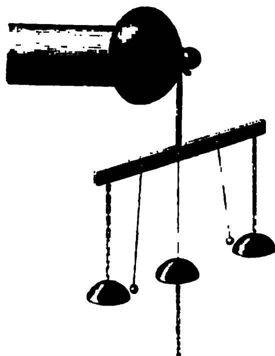


Fig. 372. — Carillon électrique.

La figure 373 représente un appareil imaginé par Volta,

dans le but d'expliquer le mouvement des grêlons pendant les orages. C'est une cloche en verre, communiquant avec le sol, par le plateau sur lequel elle repose. Une tringle métallique est en contact, par son extrémité extérieure, avec le conducteur d'une machine électrique, et soutient par l'autre extrémité, à l'intérieur de la cloche, un plateau de métal. Sur le fond de la cloche se trouvent un certain nombre de balles de sureau. Aussitôt que la machine est chargée, l'électricité se répand sur le plateau, attire les balles, qui s'électrisent par influence et viennent au contact; alors elles sont repoussées et tombent sur le fond de la cloche, où elles se déchargent de leur électricité et reviennent à l'état neutre. Ces mouvements de va-et-vient continuent, tant que le conducteur est chargé d'électricité. Le phénomène est connu sous le nom de *grêle électrique*. On remplace quelquefois les balles de sureau par de petits bonshommes construits avec la même matière, et l'on a alors ce qu'on nomme la *danse des pantins*.



Fig. 373. Grêle électrique.

Ces trois expériences ne font, comme on voit, que mettre en jeu, sous une forme amusante, les phénomènes d'attraction et de répulsion électriques. Étudions maintenant les effets de la décharge électrique entre les corps conducteurs.

Nous avons vu que si un corps isolant, un bâton de verre par exemple, est électrisé, en approchant le doigt d'un de ses points, il y a production d'une étincelle, accompagnée d'un petit bruit sec; mais le verre reste électrisé dans les points qui n'ont pas été touchés, ce qui s'explique par la non-conduc-

tibilité du corps employé. Si l'on substitue au corps isolant un conducteur, par exemple celui d'une machine électrique chargée, l'effet produit est beaucoup plus énergique et la décharge plus complète. D'ailleurs, les phénomènes qu'on observe alors dépendent de la façon dont s'opère la décharge, c'est-à-dire de la nature du milieu interposé entre le conducteur électrisé et le corps soumis à l'influence.

Si l'on approche le doigt ou toute autre partie du corps, du conducteur de la machine, une étincelle jaillit, et l'on éprouve une commotion d'autant plus forte que la charge est plus considérable. L'électroscope à cadran, placé sur le conducteur, retombe alors à zéro, indiquant par là que la machine est déchargée. Mais quand on tourne le plateau d'une façon continue, les étincelles se succèdent très-rapprochées, le bruit forme une sorte de pétillement et on ressent un picotement sans secousse brusque. Si la main n'est pas très-rapprochée du conducteur, la tension des deux électricités, tant celle de la machine que celle développée dans le corps par influence, devient plus forte; et quand elle est suffisante pour vaincre la résistance que la plus grande distance oppose à leur recomposition, on voit jaillir une plus longue étincelle, et la secousse ébranle tout le bras. Si, avant de tourner le plateau de la machine, on fait monter une personne sur un tabouret isolant ou à pieds de verre, et que cette personne pose la main sur le conducteur, elle se trouvera électrisée en même temps que ce dernier; son corps fait pour ainsi dire alors partie du conducteur. Une autre personne non isolée pourra donc en tirer des étincelles, et toutes les deux recevront ainsi à la fois la secousse que provoque la décharge.

Les effets lumineux que produit le dégagement de l'électricité méritent une étude spéciale et détaillée. Nous y reviendrons plus tard, quand nous aurons passé en revue les divers modes de production de l'électricité. Mais nous pouvons dès maintenant décrire quelques expériences où la production de l'étincelle donne lieu à des jeux de lumière singuliers.

On colle à la surface d'un tube de verre de petits losanges de feuilles d'étain, qui se succèdent de manière à former une courbe en forme d'hélice, tout en laissant entre eux un petit intervalle. Les deux extrémités de l'hélice et du tube sont deux anneaux métalliques, dont l'un s'accroche au conducteur de la machine électrique, tandis que l'autre communique avec le sol par une chaîne (celle-ci est oubliée sur la figure). Aussitôt qu'on charge la machine, il y a décomposition par influence de l'électricité neutre du premier losange d'étain, puis du second par le premier, et ainsi de suite de toute la série. La faible distance donne lieu à des décharges simultanées; des étincelles jaillissent à la fois sur tout le pourtour du tube, et le phénomène dure tant qu'on tourne le plateau (fig. 374). C'est l'expérience du *tube étincelant*.



Fig. 374. — Tube étincelant.

On obtient des effets de lumière semblables avec un globe de verre, à la surface duquel les petits losanges d'étain sont collés de façon à reproduire des dessins variés. C'est alors le *globe étincelant* (fig. 375).

Si, sur une bande rectangulaire de verre, on colle des bandes d'étain formant une série ininterrompue de lignes parallèles, comme le montre la figure 376, on pourra sur ce fond découper un dessin de forme quelconque à l'aide d'une pointe. Une étincelle jaillira à chaque solution de continuité, aussitôt qu'on mettra en communication les deux extrémités de la série, l'une avec le conducteur de la machine, l'autre avec le sol, et l'on verra, sous forme de lignes lumineuses, la figure dissinée sur le verre. C'est le *carreau étincelant*. Le *carreau magique* ne diffère du précédent que par la disposition irrégulière des parcelles de métal entre lesquelles jaillit la lumière électrique : on a jeté au hasard de la limaille métallique sur la surface du

verre enduite d'une couche de gomme. Dès que le carreau est mis en communication d'un côté avec la machine, de l'autre avec le sol, on voit les étincelles jaillir et dessiner des lignes irrégulières et serpentantes, dont la position et la figure changent à tout moment.

Dans les expériences que nous venons de décrire, la décharge a lieu entre deux corps chargés d'électricités opposées,



Fig. 375. — Globe étincelant.



Fig. 376. — Carreau étincelant.

séparés l'un de l'autre par un milieu isolant, tels que l'air, le verre. On nomme *décharge disruptive* cette recomposition des deux électricités, parce qu'elle est accompagnée d'un mouvement violent des molécules du corps isolant, ainsi que le prouve l'expérience suivante.

Deux tubes communiquants, d'inégal diamètre, le plus gros complétement fermé, le plus petit ouvert par en haut, contiennent une certaine quantité d'eau (fig. 377). Dans le gros tube, deux tiges métalliques, terminées par des boules, sont fixées l'une à la base inférieure, l'autre à la base supérieure, et com-

muniquent la première avec le sol, la seconde avec le conducteur d'une machine électrique. Dès que jaillit l'étincelle, on voit l'eau se soulever brusquement dans le tube ouvert, puis reprendre immédiatement son niveau. Cette secousse est produite par l'ébranlement violent des molécules de l'air, et non par une expansion due à une élévation de température



Fig. 377. — Thermomètre de Kinnersley.



Fig. 378. — Mortier électrique.

de toute la masse gazeuse, comme le crut d'abord Kinnersley, inventeur de l'expérience. Néanmoins le nom de *thermomètre de Kinnersley* est resté à l'appareil.

L'expansion brusque dont nous venons de parler a fait imaginer le *mortier électrique* (fig. 378), dont le jeu est facile à comprendre d'après ce qui précède. Au moment où l'étincelle jaillit, la balle est lancée au loin.

§ V. LES CONDENSATEURS ÉLECTRIQUES; LA BOUTEILLE DE LEYDE.

Cunéus, élève de Muschenbroeck, célèbre physicien du dernier siècle, voulut un jour électriser de l'eau contenue dans une bouteille à large goulot. Dans ce but, il prit la bouteille d'une main, après avoir introduit dans le liquide une tige de métal suspendue au conducteur d'une machine électrique. Quand il crut l'eau suffisamment chargée d'électricité, il voulut,

sans cesser de soutenir la bouteille d'une main, enlever avec l'autre main le fil de fer en contact avec le conducteur. Il ressentit aussitôt une commotion dont la violence le remplit de surprise. Muschenbroeck répéta l'expérience de Cunéus; mais la secousse qu'il éprouva lui causa une frayeur si vive, qu'en faisant part à Réaumur de ce fait, nouveau parmi les phénomènes d'électricité connus à cette époque, il lui écrivait que, pour rien au monde, lui offrît-on la couronne de France, il ne

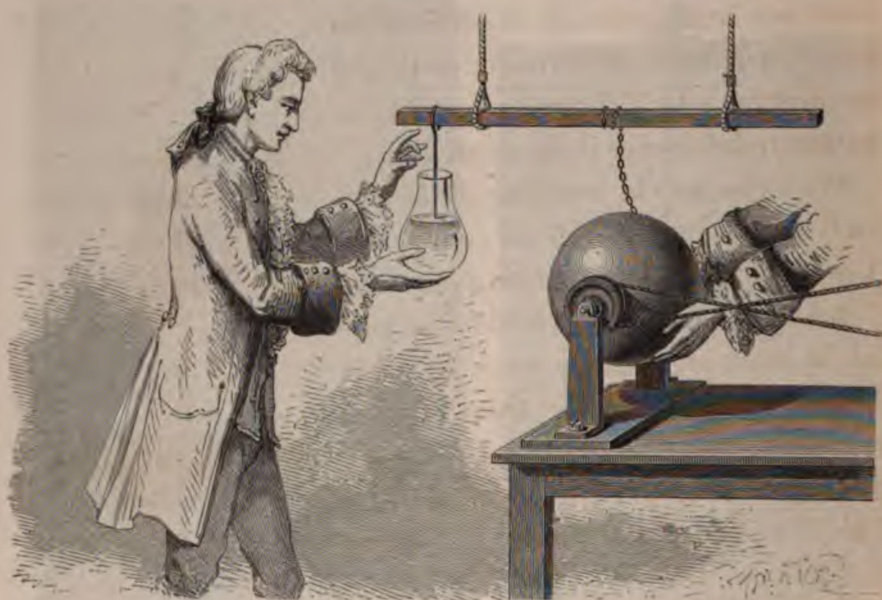


Fig. 379. — Expérience de Cunéus; bouteille de Leyde.

voudrait recommencer. Mais d'autres physiciens furent moins timides. Allaman, Lemonnier, Winckler, l'abbé Nollet varièrent l'expérience de toutes les façons, et la science fut dotée d'un nouvel appareil électrique : c'est la *bouteille de Leyde*, ainsi nommée du lieu où l'expérience fut faite pour la première fois, en 1746. Voici comment on construit aujourd'hui cet appareil.

On prend un flacon de verre, d'une faible épaisseur, dont on recouvre le fond et les trois quarts de sa hauteur d'une lame métallique, ordinairement en étain : cette lame est ce

qu'on nomme la *garniture* ou *armature extérieure* de la bouteille. La *garniture* ou *armature intérieure* est tantôt une lame de métal tapissant les parois internes, tantôt un monceau de feuilles d'or ou de clinquant dont on remplit le flacon; on a vu que, dans la bouteille de Muschenbroeck, c'était une certaine quantité d'eau, c'est-à-dire dans tous les cas un corps conducteur. Enfin, une tige en laiton à crochet terminée extérieurement par une petite boule est fixée au bouchon de liége qui ferme le goulot, et en dedans elle communique avec la garniture intérieure de la bouteille.


Fig. 380. — Charge de la bouteille de Leyde.

Pour charger la bouteille de Leyde, on la suspend par sa tige au conducteur d'une machine électrique, en ayant soin d'établir, à l'aide d'une chaîne de métal, la commmunication entre le sol et son armature extérieure. On peut aussi plus simplement la prendre à la main par cette dernière, et présenter alors au conducteur de la machine le bouton de sa tige.

La bouteille ainsi chargée d'électricité, si on vient à unir à l'aide d'un corps conducteur quelconque les deux armatures extérieure et intérieure, il y aura décharge avec accompagnement d'étincelle et explosion. Par exemple, en tenant l'appareil d'une main et approchant l'autre main du bouton, la décharge se fera par l'intermédiaire des bras et du corps, et l'on éprouvera la commotion qui effraya si fort les premiers expérimentateurs. Si plusieurs personnes se tiennent par la main, deux à deux, la première de la série prenant la bouteille et présentant la tige à la dernière, aussitôt que le contact aura lieu, la commotion se fera sentir à la fois dans les membres de tous les opérateurs. Nollet fit cette expérience

devant Louis XV : trois cents gardes françaises formèrent la chaîne, et reçurent simultanément la secousse produite par la décharge instantanée de la bouteille de Leyde.

Avant d'aller plus loin et de décrire plusieurs expériences curieuses qu'on peut faire avec cet appareil, essayons de donner l'explication théorique du double phénomène de la charge et de la décharge de la bouteille.

Observons d'abord que l'appareil se compose essentiellement de deux corps conducteurs, les deux garnitures métalliques extérieure et intérieure, et d'un corps isolant qui les sépare, la bouteille de verre. Quand on suspend le crochet au conducteur électrisé d'une machine, l'électricité de ce conducteur se répand sur toute la surface de l'armature intérieure, qui se trouve ainsi chargée d'électricité positive, par exemple. Cette électricité décompose par influence l'électricité neutre de l'armature extérieure, attire à la surface du verre l'électricité négative et refoule dans le sol l'électricité positive, par l'intermédiaire du corps de l'expérimentateur ou de la chaîne métallique. Ainsi se trouvent en présence deux charges d'électricités contraires, que l'interposition de la lame de verre isolante empêche de se combiner. Qu'on vienne à favoriser la réunion de ces deux électricités, par un conductenr quelconque, et leur combinaison se fait avec explosion et étincelle.

Jusqu'ici, il ne semble pas qu'il y ait nécessité de faire intervenir aucune autre explication : l'explication qui précède est d'ailleurs celle qui rend compte des phénomènes d'électrisation par influence. Mais on va voir qu'elle est, en réalité, insuffisante.

D'abord, la grosseur de l'étincelle et la violence des commotions indiquent ici une tension électrique d'une énergie inaccoutumée : l'accumulation des deux électricités en aussi grande quantité ne paraît plus en rapport avec les faibles dimensions des conducteurs qui composent l'appareil. Voici maintenant un autre fait qu'il faut expliquer : quand on a déchargé une bouteille de Leyde, et qu'on la laisse de côté un

certain temps, on la trouve de nouveau chargée sans qu'on l'ait à nouveau mise en communication avec une source d'électricité. On peut en tirer une nouvelle étincelle, moins forte, il est vrai, que la première. C'est ce qu'on nomme une *décharge secondaire*. Il est donc évident que la *bouteille de Leyde* permet d'accumuler une quantité d'électricité supérieure à celle qu'on peut obtenir sur de simples conducteurs isolés. Pour cette raison, on lui donne, ainsi qu'à tous les appareils analogues, le



Fig. 381. — Condensateur d'Æpinus.

nom de *condensateur*. D'où vient cette puissance d'accumulation, et quels phénomènes nouveaux interviennent pour la produire ? C'est ce que nous allons essayer de faire comprendre, en résumant, dans ce qu'elle a d'essentiel pour l'intelligence des phénomènes précédents, la théorie de la *condensation électrique*, qu'Æpinus a formulée le premier.

Le condensateur imaginé par ce physicien est représenté dans la figure 381. Ce sont deux plateaux métalliques isolés, A, B, montés en regard l'un de l'autre sur deux colonnes de verre, et séparés par un disque de verre. En glissant sur une rainure, ils peuvent s'approcher autant qu'on voudra l'un de l'autre,

ou du moins n'avoir plus entre eux que l'épaisseur du disque isolant. Des électroscopes à cadran sont fixés sur les tiges métalliques qui soutiennent les deux plateaux.

Supposons d'abord les plateaux éloignés l'un de l'autre, et mettons A en communication avec la machine électrique. Il se charge d'électricité positive, dont la tension finit par être égale à celle de la source : son pendule diverge. De plus, cette tension est à peu près également distribuée sur les deux faces du plateau A (fig. 381). Approchons maintenant l'un de l'autre les plateaux A et B ; ce dernier va se charger, par induc-

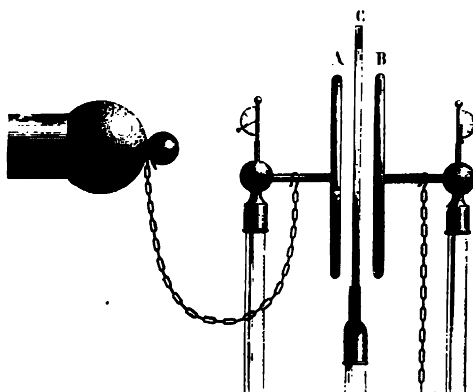


Fig. 382. — Charge du condensateur d'Æpinus.

tion, d'électricité négative sur la face regardant le disque de verre et d'électricité positive sur l'autre face; son pendule divergera aussi ; mais si l'on supprime alors la communication de A avec la machine électrique, l'attraction de l'électricité négative de B pour l'électricité positive de A va accumuler celle-ci sur la face antérieure du plateau, et le pendule de A retombera à zéro. En ce moment, si l'on fait communiquer B avec le sol, le fluide positif s'écoule, une nouvelle décomposition se fait, l'électricité négative s'accumule sur la face antérieure de ce plateau, en quantité plus grande qu'auparavant; et par réaction, la tension sur le plateau A est devenue plus énergique sur la face antérieure, au détriment de la face postérieure qui revient

à l'état naturel. Aussi, quand on rétablit la communication de A avec la machine électrique, une nouvelle quantité d'électricité positive passera sur A, et la condensation augmentera encore (fig. 382). La même série d'opérations continuée à plusieurs reprises, amènera une condensation maximum sur l'un et l'autre plateau.

Il est bien aisé de voir maintenant que le condensateur d'Æpinus et la bouteille de Leyde ne diffèrent que par la forme, et que les phénomènes, dont on peut observer la succession dans l'un, se passent de la même façon dans l'autre.

Maintenant, quel est le rôle du disque de verre? La théorie et l'expérience montrent qu'une lame de toute autre substance isolante, une lame d'air, par exemple, interposée entre les conducteurs, donnerait lieu aux mêmes phénomènes ; mais l'air offrant une résistance bien plus faible que le verre aux tensions opposées des électricités contraires, accumulées sur les faces en regard des conducteurs, on n'obtiendrait qu'une faible condensation. De là, la nécessité d'interposer un corps plus résistant, comme le verre ou la résine.



Fig. 383. — Bouteille de Leyde à armatures mobiles.

Il y a plus : d'après les expériences nombreuses de Faraday et de Matteucci, il est prouvé que les deux charges positive et négative ne sont pas seulement accumulées sur les surfaces en contact du verre et des armatures des condensateurs. Les électricités pénètrent dans le verre à une certaine profondeur. On met ce fait en évidence avec une bouteille de Leyde à armatures mobiles, formées de trois parties telles que les représente la figure 383. Après avoir chargé la bouteille assemblée, on la pose sur un isolant ; on enlève la garniture intérieure avec un crochet de verre, puis le bocal en verre, et l'on reconnaît qu'il y a très-peu d'électricité sur les armatures, tandis

que le bocal est fortement électrisé. Du reste, après avoir déchargé les deux garnitures, si on les remet en place, la bouteille fournit une étincelle aussi vive que si des décharges partielles n'avaient pas eu lieu.

La pénétration de l'électricité à une certaine profondeur dans le corps isolant des condensateurs explique fort bien, comme on voit, les décharges secondaires de la bouteille de Leyde. Elle montre, en outre, que les armatures métalliques ont aussi pour rôle de mettre en communication facile les divers points du verre, et l'on comprend que, grâce à leur conductibilité, la décharge se fasse instantanément avec toute son énergie.

§ II. EXPÉRIENCES FAITES A L'AIDE DE LA BOUTEILLE DE LEYDE ET DES BATTERIES ÉLECTRIQUES.

Décrivons maintenant quelques expériences curieuses, aisées à faire avec ce condensateur.



Fig. 384. — Décharge instantanée d'une bouteille de Leyde, à l'aide de l'excitateur.

La décharge d'une bouteille de Leyde peut se faire instantanément ou graduellement, sans que l'expérimentateur ait à redouter de commotion.

La décharge instantanée se fait à l'aide d'un *excitateur :* ce sont deux arcs métalliques, pouvant tourner autour d'une articulation commune et munis de manches en verre (fig. 384). On prend un de ces manches à chaque main, et on approche les deux boules métalliques qui terminent les arcs, l'une du bouton de l'armature intérieure, l'autre de l'armature extérieure



Fig. 385. — Décharges successives d'une bouteille de Leyde. Carillon.



Fig. 386. — Bouteille de Leyde étincelante.

de la bouteille de Leyde, et la décharge se fait dans les branches de l'excitateur.

Les décharges successives se font quelquefois avec la *bouteille de Leyde à carillon.* La figure 385 montre comment le pendule isolé qui surmonte un timbre monté sur un pied métallique et communiquant avec la garniture extérieure, est attiré, puis repoussé successivement par l'armature intérieure, pour subir ensuite les mêmes actions de l'autre timbre. A chaque contact, la balle prend, tantôt à l'une tantôt à l'autre des deux armatures, une partie de son électricité. La bouteille est ainsi

peu à peu déchargée. On donne quelquefois à la balle du pendule la forme d'une araignée dont les pattes sont des brins de soie.

L'expérience de la bouteille étincelante (fig. 386) sert à montrer que, dans la décharge instantanée, l'électricité vient de tous les points du verre converger vers le point où a lieu la



Fig. 387. — Figures de Leichtenberg. Distribution des deux espèces d'électricité.

réunion des électricités accumulées sur les deux garnitures. L'armature extérieure est formée, comme dans le carreau magique, de fragments de limaille métallique ou de clinquant, fixés sur une couche de gomme. A l'armature intérieure est fixée une bande de métal qui aboutit à une très-petite distance de la garniture extérieure. Quand la bouteille est chargée suffisamment, on voit des traits de feu sillonner

en serpentant sa surface, à partir du point où commence la décharge.

On a vu tout à l'heure que la bouteille de Leyde se charge d'électricités contraires sur les deux faces des garnitures. Un physicien allemand a imaginé une expérience fort intéressante qui met en évidence le fait dont nous parlons. Il prenait un gâteau de résine, comme celui de l'électrophore, puis chargeait une bouteille de Leyde, et traçait avec le



Fig. 388. — Figures de Leichtenberg. Distribution de l'électricité positive.

bouton une figure quelconque, la lettre G par exemple, sur le gâteau. Posant la bouteille, puis la saisissant de nouveau, mais par le crochet, il traçait un autre dessin sur le gâteau avec le bord inférieur de la bouteille. Cela fait, il projetait avec un soufflet, rempli d'une poudre formée de minium et de soufre mélangés, un nuage pulvérulent sur la surface du gâteau, et l'on voyait le minium se porter sur les points touchés par le bouton, c'est-à-dire électrisés négativement, tandis que le soufre s'attachait aux points chargés d'électricité positive. Les figures 387, 388 et 389 sont des fac-simile

de figures de Leichtenberg, qu'a faites obligeamment pour nous M. Saint-Edme, préparateur du cours de physique au Conservatoire des Arts et Métiers. Les deux dessins, positif et négatif, obtenus par le contact de la résine avec les deux garnitures se distinguent non-seulement par la couleur des poudres qui les recouvrent, mais aussi par la forme des ramifications singulières que les électricités contraires ont tracées sur la résine.

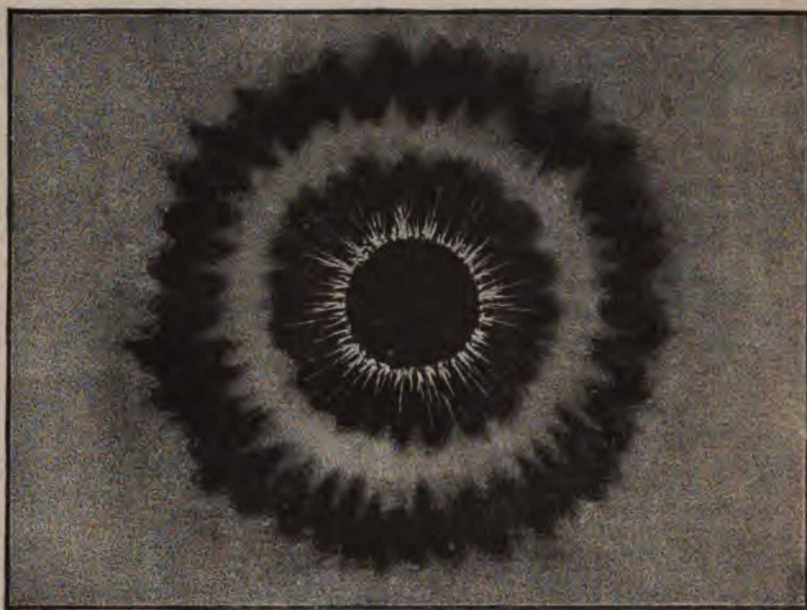


Fig. 389. — Figures de Leichtenberg. Distribution de l'électricité négative.

Pour obtenir des effets plus énergiques, on donne à la bouteille de Leyde des dimensions plus considérables. Le bocal en verre a une large ouverture, qui permet de coller à l'intérieur une feuille d'étain semblable à la garniture extérieure : c'est ce qu'on nomme alors une *jarre électrique*. Plusieurs jarres, assemblées comme le montre la figure 390, forment une *batterie*. Alors toutes les garnitures intérieures communiquent ensemble à l'aide de tiges métalliques, partant du bouton de chacune d'elles et rayonnant vers la boule plus grosse de la jarre centrale : c'est cette dernière boule qu'on

met en communication avec le conducteur de la machine électrique, quand on veut charger la batterie. Quant aux armatures extérieures, elles sont reliées entre elles par leur contact avec une feuille d'étain dont les parois intérieures de la boîte sont recouvertes, et qui communique elle-même au sol par l'intermédiaire d'une chaîne métallique.

La charge électrique que ces puissants condensateurs accumulent sur leurs armatures est considérable, et il faut beaucoup

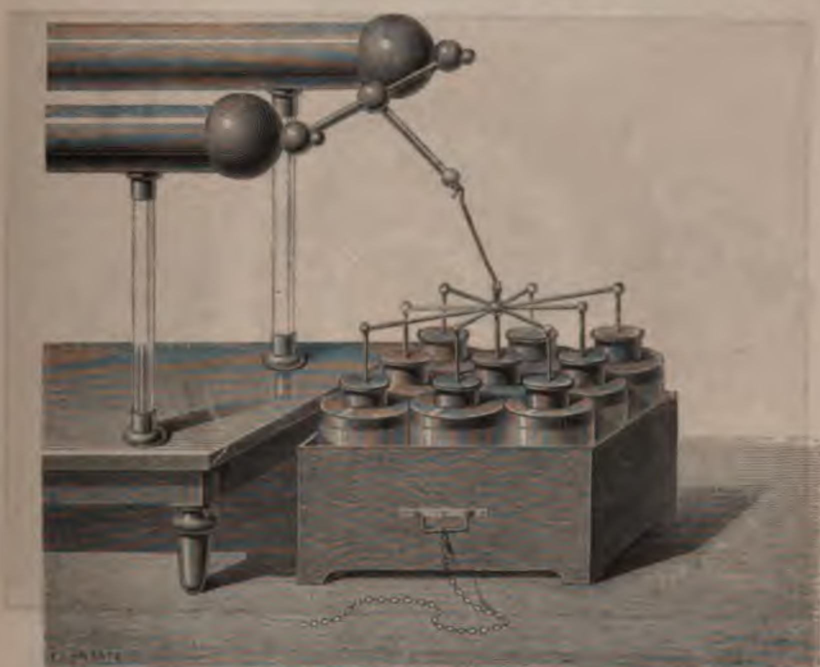


Fig. 390. — Batterie de jarres électriques.

de temps pour leur fournir, à l'aide des machines ordinaires, toute l'électricité qu'ils sont susceptibles de condenser. On peut rendre l'opération plus rapide en divisant une batterie en plusieurs batteries, renfermant chacune deux ou trois jarres, et en les faisant communiquer deux à deux par des tringles unissant les armatures intérieures. C'est ce qu'on nomme la *charge par cascade;* mais les batteries partielles sont alors inégalement chargées, selon l'ordre qu'elles occupent par rapport à la batterie qui est en rapport direct avec la source

d'électricité. Les décharges des batteries électriques sont d'autant plus dangereuses, que les jarres ont une plus grande surface, et que leur nombre est plus considérable. Une batterie de six éléments de moyenne grosseur donne déjà des commotions très-fortes, susceptibles de tuer certains animaux, par exemple des lapins, des chiens. Aussi doit-on prendre des précautions, quand on veut les décharger. On peut employer dans

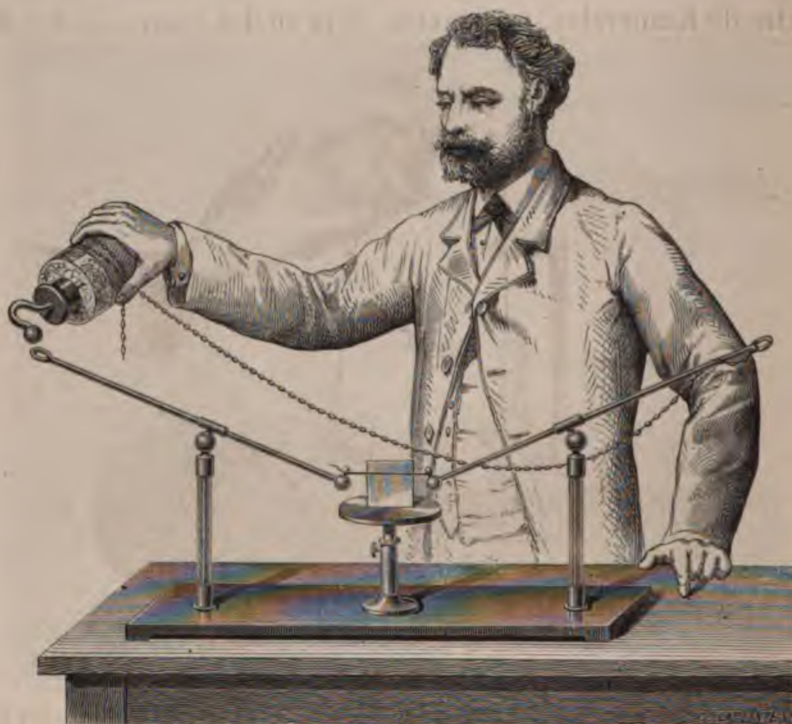


Fig. 391. — Excitateur universel.

ce but l'*excitateur universel*, qui sert du reste dans un grand nombre d'expériences. Cet appareil est formé de deux tringles en laiton, terminées chacune, d'un côté par un anneau où peut s'engager une chaîne, de l'autre par un bouton. Chaque tringle est isolée par un support en verre, et mobile autour d'un genou. Les deux boutons aboutissent au-dessus d'un support, sur lequel on place le corps à travers lequel on veut faire passer la décharge. L'une des chaînes communique avec

le sol, l'autre avec la branche d'un excitateur ordinaire, à l'aide duquel on touche alors sans danger le bouton central de la batterie électrique.

Terminons par la description de quelques expériences qui nous feront connaître les divers effets mécaniques et physiques de l'électricité accumulée dans les condensateurs.

Dans les expériences du mortier électrique et du thermomètre de Kinnersley, nous avons déjà vu des exemples des ef-



Fig. 392. — Expérience du perce-carte.

fets mécaniques que produit la décharge disruptive. Le déplacement violent des molécules du corps interposé entre les deux conducteurs, est encore rendu manifeste dans le *perce-carte* et le *perce-verre*.

Une carte est placée entre deux pointes de conducteurs métalliques séparés par un cylindre de verre. On prend à la main une bouteille de Leyde chargée, dont la garniture extérieure est mise en communication avec l'un des conducteurs par une chaîne métallique; puis, on approche le bouton de la garniture intérieure d'un point de l'autre conducteur. La décharge a lieu à travers la carte, qu'on trouve percée d'un trou

entre les deux pointes. On n'explique pas comment il se fait que, dans l'air, le trou est plus près de la pointe négative que de la pointe positive, tandis qu'il n'en est plus ainsi dans le vide.

On perce de la même façon une lame de verre de 1 ou 2 millimètres d'épaisseur, placée horizontalement entre deux pointes. Il faut avoir soin seulement, pour éviter que l'électricité se diffuse sur le verre, d'imbiber d'une goutte d'huile

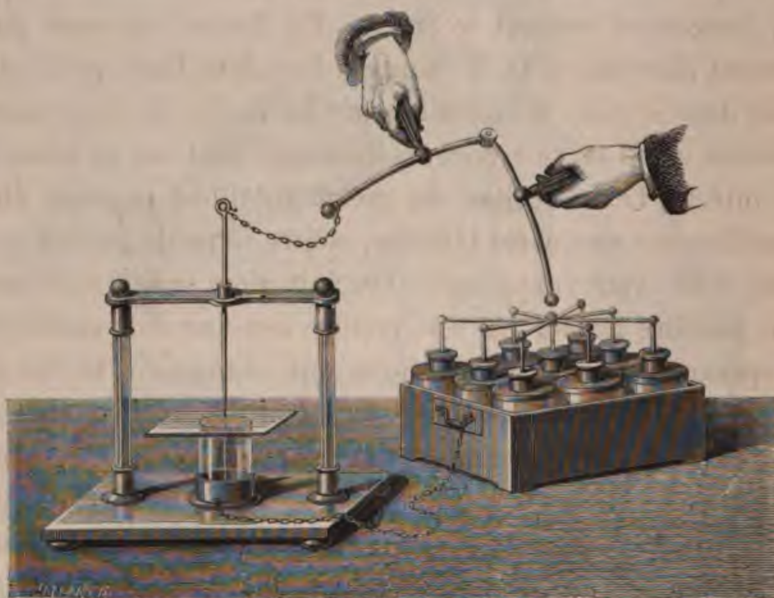


Fig. 393. — Expérience du perce-verre.

chaque pointe métallique. Après la décharge, on aperçoit dans la lame un petit trou rond; le verre a été pulvérisé par le passage de l'électricité. Pour que cette expérience réussisse, il est nécessaire d'employer une batterie puissante. Mais, alors même que la décharge n'est pas assez énergique pour percer la verre, la lame se trouve altérée et dépolie au point par où a jailli l'étincelle.

Les effets calorifiques de la décharge électrique ne sont pas moins intéressants que les effets mécaniques. Si l'on réunit

les deux boules de l'excitateur universel (fig. 391) par un fil métallique très-fin, d'argent doré par exemple, le fil s'échauffe, devient incandescent : et il est fondu et volatilisé, si la charge électrique est suffisamment énergique. Avec les puissantes batteries du Conservatoire des Arts et Métiers, on arrive à fondre des fils de fer de plusieurs mètres de longueur. Des fils de même diamètre et de même longueur exigent, du reste, des charges électriques fort différentes pour être fondus : le fer, le plomb et le platine se liquéfient plus facilement que l'or, l'argent et surtout le cuivre. La fusion est aussi plus aisément obtenue, si la décharge a lieu dans l'air, que si elle se fait dans le vide. Si l'on met entre les boules de l'excitateur universel un fil de soie doré, la décharge fond l'or et laisse la soie intacte. Les parcelles du métal volatilisé peuvent être recueillies sur une carte blanche, contre laquelle on fait appuyer le fil avant l'expérience. On voit alors sur la carte une tâche noirâtre formée par une poudre très-fine d'or volatilisé. En opérant sur différents métaux, on obtient des taches de couleurs variées, et si les métaux employés sont oxydables aux températures très-hautes, les empreintes obtenues sont formées par les oxydes métalliques réduits en poudre impalpable. Van Marum a fait, au dernier siècle, de très-belles expériences sur le transport des métaux par la décharge électrique. Fusinieri, ayant fait passer une décharge entre deux boules, l'une d'or, l'autre d'argent, observa que la première était argentée et la seconde dorée, autour des points entre lesquels avait jailli l'étincelle. Il est probable que les phénomènes dont nous venons de parler sont complexes, et sont dus, tout à la fois, à l'élévation de température produite par la décharge et à un transport mécanique des molécules.

On a mis à profit cette propriété pour obtenir des empreintes métalliques reproduisant des dessins variés. Dans les cours, on fait l'expérience dite du *portrait de Franklin.* On voit dans la figure 394 une feuille de papier épais dans laquelle se trouve

découpé le portrait de l'illustre physicien; des lames d'étain sont collées de chaque côté de la feuille, qu'on recouvre par-dessus d'une feuille d'or et par-dessous d'un morceau de soie blanche. Après avoir rabattu sur la feuille d'or les parties du



Fig. 394. Expérience du portrait de Franklin.

papier qu'on voit au-dessus et au-dessous du portrait, on place le tout dans une presse (fig. 395), dont on serre les écrous pour rendre le contact parfait, et la presse est elle-même placée sur le support de l'excitateur universel. Quand



Fig. 395. — Presse employée dans l'expérience du portrait de Franklin.

les boules de l'excitateur sont en contact avec les bandes d'étain qui débordent latéralement, on fait passer la décharge. La feuille d'or volatilisée donne sur la soie une empreinte noirâtre qni reproduit toutes les découpures, et le dessin se trouve ainsi imprimé par l'électricité.

La fusion des fils métalliques est une preuve certaine de l'élévation de température qui accompagne les décharges électriques, quand elles ont lieu à travers un conducteur. Les décharges disruptives, c'est-à-dire celles qui se font à travers un isolant, comme l'air, avec production d'étincelle, donnent lieu aussi à des effets calorifiques, bien qu'en tirant l'étincelle avec le doigt, on n'éprouve aucune sensation de chaleur. On enflamme des matières combustibles, de la poudre, de l'éther en faisant jaillir l'étincelle en un point quelconque de la substance. Cette expérience se faisait autrefois de la façon suivante : une personne, montée sur un tabouret isolant, touchait d'une main le conducteur d'une machine électrique, et de l'autre présentait la pointe d'une épée à une faible distance d'une soucoupe pleine d'éther que tenait à la main une autre personne. Le liquide prenait feu dès que l'étincelle jaillissait. Watson réussit à enflammer de l'éther à l'aide d'une étincelle sortant d'un morceau de glace.

L'étincelle électrique produit encore des effets chimiques d'un haut intérêt. Si on la fait passer dans un mélange gazeux explosif, d'oxygène et d'hydrogène par exemple, l'explosion est instantanée. C'est sur ce fait qu'est basée la construction du *pistolet de Volta*. Les figures 396 et 397 représentent une coupe diamétrale et une vue extérieure de ce petit appareil. C'est un vase sphéro-cylindrique en métal, fermé par un bouchon, et qu'on remplit d'un mélange d'hydrogène et d'oxygène. Une tige en laiton terminée par deux boules traverse la paroi inférieure du cylindre, dont elle est isolée par un tube en verre. L'appareil étant en communication avec le sol, on approche le bouton extérieur du conducteur d'une machine électrique. La combinaison des deux gaz se fait avec explosion, et le bouchon est chassé avec force et projeté au loin.

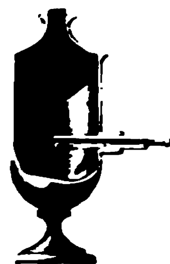


Fig. 397. — Pistolet de Volta. Vue extérieure.

L'étincelle électrique provoque une foule de réactions chi-

miques; citons dans le nombre la formation de l'acide azotique avec l'oxygène et l'azote, la décomposition de l'eau, celle de l'ammoniaque.

Enfin, nous avons déjà parlé des effets de la décharge, quand elle passe à travers les organes de l'homme et des animaux. Les commotions sont d'autant plus fortes, elles ébranlent une portion du corps d'autant plus étendue, qu'elles proviennent de charges plus puissantes; et nous avons déjà dit qu'il est



Fig. 397. — Explosion du pistolet de Volta.

dangereux de recevoir la décharge d'une batterie formée d'un petit nombre de bouteilles de Leyde. On fait avec un condensateur, qu'on nomme le *carreau fulminant*, une expérience où la secousse qu'excite la décharge produit un effet singulier et amusant. Le carreau fulminant n'est autre chose qu'une plaque rectangulaire de verre, dont chaque face se trouve recouverte d'une feuille d'étain : l'une des feuilles est tout à fait isolée, l'autre communique par une petite lame avec le cadre en bois, et de là par une chaîne métallique, avec le sol. L'autre feuille communiquant avec une source

d'électricité, le condensateur se charge. Une fois qu'il est chargé, si une personne veut prendre avec la main une pièce



Fig. 398. — Carreau fulminant.

de monnaie posée sur la feuille supérieure, elle reçoit une secousse qui fait contracter ses doigts, et l'empêche de saisir la pièce.

CHAPITRE IV.

LA PILE. — ÉLECTRICITÉ DÉVELOPPÉE PAR LES ACTIONS CHIMIQUES.

§ I. EXPÉRIENCES DE GALVANI ; DÉCOUVERTES DE VOLTA.

Dans toute les expériences que nous avons décrites jusqu'ici, la source unique de l'électricité développée à la surface des corps est une action mécanique, le frottement. C'était la seule qu'on connût à la fin du dernier siècle, quand un heureux hasard vint tout à coup révéler aux physiciens un nouveau mode de production du mystérieux agent, et provoquer une série de découvertes du plus haut intérêt, tant au point de vue de la science pure qu'au point de vue de ses applications pratiques. Deux grands noms se rattachent à l'origine de ce mouvement qui a fait accomplir à la science de l'électricité tant de progrès : ce sont ceux de Galvani et de Volta.

Galvani, savant médecin et professeur d'anatomie à l'Université de Bologne, était, un soir de l'année 1780, occupé dans son laboratoire avec quelques amis à faire des expériences relatives au fluide nerveux des animaux. Sur une table, où se trouvait une machine électrique servant aux expériences, on avait placé par hasard des grenouilles fraîchement écorchées destinées à faire du bouillon ; l'un des aides de Galvani « approcha par mégarde la pointe d'un scalpel des nerfs cruraux internes de l'un de ces animaux : aussitôt, tous les muscles des membres parurent agités de fortes convulsions. L'épouse de Galvani était présente ; elle fut frappée de la nouveauté du

phénomène ; elle crut s'apercevoir qu'il concourait avec le dégagement de l'étincelle électrique. » (P. Sue. *Histoire du Galvanisme.*) Elle avertit son mari, qui s'empressa de vérifier ce fait curieux, et reconnut que les contractions musculaires de la grenouille avaient lieu, en effet, toutes les fois qu'on tirait une étincelle, tandis qu'elles cessaient, si la machine était en repos.

Cette observation fut pour le médecin bolonais le point de départ de nombreuses expériences, par lesquelles il chercha à prouver l'identité du fluide nerveux des animaux et de l'électricité. En 1786, il continuait encore ce genre de recherches. Voulant voir un jour si l'influence de l'électricité atmosphérique sur les muscles des grenouilles serait la même que celle de l'électricité produite dans les machines, il avait, dans ce but, suspendu un certain nombre de grenouilles dépouillées au balcon d'une terrasse de sa maison. Les membres inférieurs de ces animaux se trouvaient accrochés au fer du balcon par un fil de cuivre qui passait sous les nerfs lombaires. Galvani remarqua avec surprise que, toutes les fois que les pattes venaient à toucher le balcon, les membres des grenouilles étaient contractés par de vives convulsions, bien qu'en ce moment, il n'y eût aucune trace de nuage orageux, ni par conséquent d'influence électrique de l'atmosphère.



Fig. 399.—Contraction des muscles d'une grenouille. Répétition de l'expérience de Galvani.

Ces faits suggérèrent à Galvani l'idée qu'il existait une électricité propre aux animaux, inhérente à leur organisation, que « les réservoirs principaux de cette électricité animale sont les muscles, dont chaque fibre doit être considérée comme

ayant deux surfaces, et, comme possédant par ce moyen les deux électricités positive et négative ». De là, l'assimilation qu'il fit des contractions musculaires observées dans les grenouilles et d'autres animaux, aux commotions que donne la décharge d'une bouteille de Leyde.

Alexandre Volta, alors professeur à Pavie, répéta les expériences de Galvani; mais sans adopter ses explications. Selon lui, l'électricité développée était de même nature que celle que produisent les appareils électriques : c'est le contact des métaux hétérogènes qui donne lieu à la production d'électricité, l'un des métaux se chargeant d'électricité positive et l'autre d'électricité négative, lesquelles se combinent en traversant le milieu conducteur des muscles et des nerfs.

Une discussion s'engagea entre les deux célèbres physiciens, lutte honorable pour tous les deux, et surtout profitable à la science, qui s'enrichit d'une multitude de faits nouveaux. L'invention du merveilleux appareil qui reçut le nom de *pile de Volta* fit enfin prévaloir la théorie du professeur de Pavie, bien qu'aujourd'hui l'hypothèse de Galvani sur l'existence de l'électricité animale soit en partie reconnue vraie, et que, d'autre part, les idées de Volta aient été profondément modifiées.

§ II. PILE DE VOLTA OU PILE A COLONNE.

On vient de voir que Volta pensait qu'il suffit du contact de deux métaux différents, pour produire de l'électricité. Dans le but d'étudier les circonstances de cette production, il imagina un électroscope plus sensible que l'électroscope à feuilles d'or, et qui n'est autre chose que ce dernier, dont la tige conductrice est surmontée d'un condensateur à plateau (fig. 400). Prenant alors une lame formée de deux morceaux de cuivre et de zinc soudés ensemble, il mit le cuivre en contact avec l'un des plateaux du condensateur, tandis que, par le

doigt, l'autre plateau se trouvait en communication avec le sol. Dès que les communications furent rompues, les feuilles d'or divergèrent, et il reconnut que le plateau inférieur était chargé d'électricité négative. Volta conclut de cette expérience que le simple contact des deux métaux avait suffi pour développer, sur le cuivre, l'électricité négative dont l'électromètre accusait la présence, et sur le zinc, de l'électricité positive qui s'écoule dans le sol par le corps de l'observateur. Ce qui le confirma dans cette idée, c'est qu'après plusieurs tentatives d'abord infructueuses, il finit par constater la présence de l'électricité positive dans le zinc, en touchant le plateau de l'appareil avec ce métal. A la vérité, il lui fallut, pour obtenir ce résultat, interposer entre le zinc et le cuivre du plateau un morceau de drap imbibé d'eau acidulée.



Fig. 400. — Condensateur de Volta.

Dans tout cela, Volta ne tenait nul compte du contact des doigts, toujours plus ou moins humides, avec le zinc, métal très-oxydable; ni, dans la seconde expérience, de l'influence de l'eau acidulée sur le même métal. Quoi qu'il en soit, il admit que le contact de deux métaux différents et, en général, de deux corps hétérogènes, donne lieu au développement d'une force qu'il nomme *force électro-motrice*, parce qu'elle s'oppose à la combinaison des électricités opposées produites sur chacun de ces corps par le contact de leurs surfaces. Bien que ces vues théoriques soient aujourd'hui reconnues inexactes, le fait qu'elles avaient pour objet d'expliquer était réel, et ce fait suggéra à l'illustre physicien la construction d'un appareil qu'on a considéré, à juste titre, comme la découverte capitale des sciences physiques dans les temps modernes. Nous voulons

parler de la pile qui porte son nom, de la *pile de Volta*, imaginée en l'année 1800.

Voici en quoi consiste cet appareil, aussi simple que merveilleux.

Deux disques superposés, l'un de cuivre, l'autre de zinc, forment ce que Volta appelait un *couple électro-moteur*. Un certain nombre de ces couples sont placés les uns au-dessus des autres, de manière que les deux métaux soient toujours placés dans le même ordre, le cuivre en bas, le zinc en haut. De plus, deux couples quelconques sont séparés par une rondelle de drap imbibé d'eau acidulée, additionnée par exemple de quelques gouttes d'acide sulfurique. L'ensemble de ces couples, formant une colonne cylindrique ou pile, est maintenu entre trois colonnes de verre et repose, par un disque isolant aussi de verre, sur un socle en bois. Telle est la pile, comme la construisait alors Volta, et comme on la construit encore, sauf une modification dont il sera question tout à l'heure. Voici maintenant quelles sont ses propriétés.

D'un bout à l'autre de la colonne cylindrique, chaque couple se trouve chargé d'électricité; électricité positive sur le zinc et négative sur le cuivre; c'est ce dont il est facile de s'assurer à l'aide d'un électromètre condensateur. Mais la tension électrique varie selon la distance de chaque couple aux deux extrémités de la pile: au milieu, cette tension est nulle; et à partir de là, la tension négative va en croissant jusqu'au couple inférieur, et la tension positive va également en croissant jusqu'au couple supérieur. Plus le nombre des éléments ou des couples est considérable, plus ces tensions de l'électricité aux deux extrémités de la pile sont considérables elles-mêmes.

Dans la pile construite par Volta, et disposée comme nous venons de le dire, c'est un disque de cuivre qui forme l'extrémité inférieure, tandis que la supérieure est terminée par un disque de zinc. Ces deux disques sont supprimés dans les piles à colonnes telles qu'on les construit aujourd'hui. Voici pourquoi. Volta croyait que le véritable couple électromo-

teur était l'assemblage des deux métaux en contact, zinc et cuivre, et que la rondelle de drap humide jouait le simple rôle de conducteur. Aujourd'hui, il est démontré que la force électromotrice prend naissance à la surface de contact du drap humide et du zinc, sous l'influence de la combinaison chimique du métal et de l'acide : le véritable couple est donc formé du zinc et du cuivre, séparés par le liquide dont le drap est imbibé. Dès lors, le disque cuivre de l'extrémité inférieure



Fig. 401. — Pile de Volta ou à colonne.



Fig. 402. Disposition des couples.

et le zinc de l'extrémité supérieure sont inutiles : on les supprime donc. Mais, après cette suppression, les tensions électriques restent distribuées comme elles l'étaient auparavant : c'est-à-dire que la tension est négative sur le zinc inférieur, positive sur le cuivre supérieur. De là, les noms de *pôle négatif* et de *pôle positif* donnés aux deux extrémités de la pile.

La pile construite et ainsi chargée, si l'on met en communication les deux pôles par un corps conducteur, les deux électricités opposées se combinent, et au moment du contact, une décharge a lieu. Par exemple, en touchant le pôle positif

avec une main, le pôle négatif avec l'autre, on éprouve une commotion analogue à celle que donne la bouteille de Leyde; puis, le contact durant toujours, on éprouve dans les mains une sensation particulière de chaleur et de frémissement. Si les deux pôles sont réunis par deux fils métalliques soudés, l'un au cuivre, l'autre au zinc extrêmes, une étincelle se produit au moment où les fils vont se toucher; mais, après cette décharge partielle, la pile se recharge aussitôt, et les mêmes phénomènes peuvent être reproduits pendant un temps assez long. C'est cette propriété de la pile de fournir de l'électricité d'une façon continue qui caractérise ce précieux appareil et donne lieu aux effets variés que nous décrirons plus loin.

Depuis Volta, la pile a été modifiée, et on la construit sous une multitude de formes, dont nous décrirons tout à l'heure les plus importantes. Mais, comme tous ces appareils sont fondés sur le même principe, celui de la production de l'électricité par les actions chimiques, il importe de démontrer par l'expérience la vérité de ce principe. C'est ce que nous allons faire maintenant.

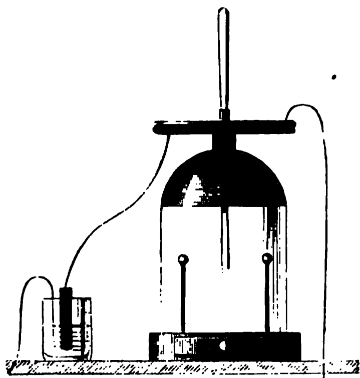


Fig. 403. — Électricité développée par les actions chimiques.

Plongeons une lame de cuivre dans un verre qui contient de l'acide azotique étendu d'eau (fig. 403). Faisons communiquer la lame avec le plateau inférieur d'un électromètre condensateur, tandis que le liquide, ainsi que le plateau supérieur, communiquent avec le sol. Dès qu'on sépare les deux plateaux, les feuilles d'or divergent, et l'on trouve que l'appareil est chargé d'électricité négative. Vient-on à changer l'ordre des communications, à joindre l'acide par un fil métallique au plateau inférieur du condensateur, tandis que l'autre plateau et la lame communiquent avec le sol, l'appareil sera chargé d'électricité positive. Si à la place du cuivre on

mettait un métal que n'attaque point l'acide azotique, du platine par exemple, il n'y aurait pas d'électricité dégagée.

On obtient des résultats semblables, c'est-à-dire un dégagement plus ou moins énergique d'électricité, en provoquant entre deux corps une action chimique quelconque. Deux solutions, l'une alcaline, l'autre acide, ou bien deux sels, l'un acide et l'autre neutre ou alcalin mis en contact, donnent lieu à une production d'électricité, laquelle est positive sur le corps jouant le rôle d'acide, et négative sur celui qui joue le rôle de base.

Tel est le principe de la théorie actuellement adoptée pour expliquer les effets de la pile de Volta. Ce principe rend compte des résultats trouvés par cet illustre physicien, et des expériences à l'aide desquelles il s'efforçait de démontrer que le seul contact de deux corps hétérogènes suffit à donner naissance à la force électromotrice. Quand il faisait toucher la lame de cuivre et de zinc à l'un des plateaux de l'électromètre condensateur, il ne voyait pas que la cause du dégagement de l'électricité était dans l'action chimique qui s'exerçait entre le zinc bien décapé et la main toujours un peu humide. C'est à l'oxydation du métal, non à son contact avec le cuivre, qui jouait le rôle de simple conducteur, qu'il eût fallu attribuer le développement électrique que la divergence des feuilles d'or accusait ensuite.

Que résulte-t-il de là ? C'est que le véritable couple voltaïque n'est pas, comme nous l'avons déjà dit, l'association des deux disques zinc et cuivre, mais bien le zinc, métal attaquable, et la couche d'acide dont la rondelle de drap est imbibée. Le cuivre n'est qu'un simple conducteur, sur lequel l'électricité positive développée dans l'acide s'accumule, tandis que le zinc recueille l'électricité négative. Ce que Volta a parfaitement prouvé, et ce qui subsiste indépendamment de son hypothèse, c'est que la tension de chaque espèce d'électricité, dans la pile à colonne, va en croissant à mesure qu'on approche des deux pôles. Quand ces deux pôles sont mis en communication par deux fils métalliques, c'est-à-dire conduc-

teurs, les phénomènes de tension disparaissent, la pile se décharge; mais au fur et à mesure de cette recombinaison des deux électricités, la cause productive qui est l'action chimique de l'acide sulfurique sur le zinc continue d'agir, et la pile devient ainsi une source constante d'électricité; de sorte qu'on peut assimiler ce qui se passe à un écoulement incessant des deux espèces d'électricité, de l'électricité négative vers le pôle positif et de l'électricité positive vers le pôle négatif à travers le fil interpolaire. Ces deux courants vont évidemment en sens inverse à travers les couples eux-mêmes.

On convient de donner un sens à ce double courant en ne considérant que le mouvement de l'électricité positive : c'est ce qu'on nomme le *courant de la pile*, dont le sens est, comme on vient de le voir et comme il importe de se le rappeler, du pôle négatif au pôle positif à l'intérieur de la pile, et du pôle positif au pôle négatif dans la portion du circuit formée par les deux fils réunis, qu'on nomme alors *réophores* (*porteurs de courants*).

C'est le moment de dire en quoi diffèrent les phénomènes d'électricité tels que nous les avons étudiés dans la machine électrique, la bouteille de Leyde et ceux que produit la pile.

Dans les premiers appareils, l'électricité développée reste en repos à la surface des conducteurs, ce qui lui a fait donner le nom d'*électricité statique*. Au contraire, l'électricité qui se produit incessamment dans une pile et s'écoule par les conducteurs, est de l'électricité en mouvement, d'où le nom d'*électricité dynamique*. Cependant en analysant de plus près ces deux genres de phénomènes, on voit qu'il est préférable de les caractériser d'une autre façon. Quand on réunit, à l'aide d'un conducteur, les électricités opposées qui sont accumulées sur les deux garnitures, intérieure et extérieure, d'une bouteille de Leyde, il y a bien, comme dans les piles, un courant électrique; mais ce courant ne dure qu'un moment, parce que la cause qui avait développé l'électricité n'existe plus. Dans la pile, le renouvellement de l'électricité se fait au fur et à mesure

de la recomposition, et le courant est continu. Du reste, les phénomènes produits dans les deux circonstances ont une très-grande analogie, et les différences qu'ils présentent proviennent surtout de ce que, dans le premier cas, les électricités qui se combinent sont à une tension très-élevée, tandis que, dans le second cas, elles gagnent en continuité ce qu'elles perdent en intensité. Aussi préfère-t-on aujourd'hui substituer aux dénominations que nous venons de rappeler, celle d'*électricité à haute tension*, donnée par la machine électrique ordinaire; et celle d'*électricité à basse tension*, qui caractérise l'électricité de la pile.

La pile de Volta a reçu des formes très-diverses, imaginées dans le but d'en rendre l'emploi plus commode et surtout d'en accroître l'énergie. Dans la pile à colonne primitive, cette énergie était diminuée par l'écoulement du liquide que le poids des éléments faisait suinter à l'extérieur, et qui produisait des courants extérieurs secondaires, aux dépens du courant principal. Mais dans toutes celles que nous allons énumérer, le principal est le même que celui de la pile de Volta.

La *pile à auge*, inventée par Cruikshank, est formée de plaques soudées de zinc et de cuivre, rangées parallèlement dans une caisse ou auge en bois. Les éléments, isolés par un mastic de résine, sont séparés par des compartiments qu'on remplit d'eau acidulée, quand on veut faire fonctionner la pile. Par cette disposition, les courants secondaires ne peuvent plus se produire.

Imaginez une série de tasses ou de verres remplis d'eau acidulée. Une lame recourbée deux fois, formée d'un côté de cuivre, de l'autre côté de zinc, plonge par chacune de ses extrémités dans le liquide de deux verres consécutifs, de sorte que, dans chacun de ceux-ci, se trouve à la fois une lame de cuivre et une lame de zinc. En réunissant par deux fils métalliques ou rhéophores, les deux lames, cuivre et zinc, des vases extrêmes, on a la pile à tasses, inventée par Volta, et

qu'on nomme aussi *pile à couronne*, parce que l'on range ordinairement les éléments en cercle, ainsi que le montre la figure 404.

Wollaston a imaginé la disposition suivante : chaque lame



Fig. 404. — Pile à couronne, ou à tasses.

rectangulaire de cuivre est recourbée de manière à envelopper sur ses deux faces la lame de zinc, dont elle est d'ailleurs séparée en haut et en bas par des morceaux de bois. Un

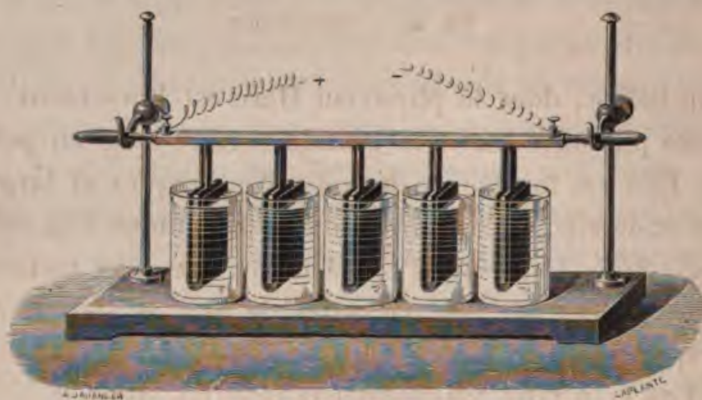


Fig. 405. — Pile de Wollaston.

ruban de cuivre est soudé au côté supérieur du zinc, et, en se recourbant deux fois à angle droit, va rejoindre la lame de cuivre du système voisin. Enfin, tous les rubans semblables sont fixés à une traverse en bois, de sorte qu'on peut élever

ou abaisser à volonté et à la fois tous les éléments. Des bocaux remplis d'eau acidulée sont disposés au-dessous de chaque élément; il suffit donc d'abaisser la traverse pour faire fonctionner la pile (fig. 405). Les avantages de la pile de Wollaston sont, outre la facilité de manœuvre, la grande étendue de la surface du zinc qui se trouve en contact avec l'acide.

Nous citerons encore les piles de Muncke, d'Œrstedt, et la



Fig. 406. — Pile en hélice.

pile en hélice, dont le physicien Hare est l'inventeur; cette dernière pile offre une très-grande surface sous un petit volume. Elle est formée de deux bandes longues et larges, de cuivre et de zinc, qui s'enroulent à la fois autour d'un cylindre de bois; mais deux spires consécutives des deux métaux sont toujours isolées par des baguettes de bois ou des morceaux de drap. Le tout est plongé dans un seau plein d'eau acidulée, quand on veut faire fonctionner la pile (fig. 406).

§ III. PILES A COURANT CONSTANT.

Dans toutes les piles qu'on vient de décrire, le courant électrique est variable. A l'origine, son intensité est aussi

grande que possible; mais des causes diverses tendent à en diminuer progressivement l'énergie. Sous l'influence du courant, l'eau se décompose partiellement; l'hydrogène, l'un des deux gaz qui la composent, se dégage sur le zinc aussi bien que sur le cuivre, et forme à la surface du métal une couche gazeuse adhérente qui diminue l'action chimique. Il se forme, en outre, des courants partiels absorbant une portion plus ou moins grande de l'électricité dégagée, et affaiblissant, dès lors,



Fig. 407. — Couple de la pile de Daniell.

le courant interpolaire. Enfin comme, par le fait même des réactions chimiques, il y a combinaison de l'oxyde de zinc avec l'acide sulfurique, produisant un sel, le sulfate de zinc, il est bien évident que le liquide s'appauvrit en acide de plus en plus. On s'est donc efforcé de rendre constants les courants des piles en modifiant la construction des simples électromoteurs. De là, les piles à courant constant, qui se distinguent des piles à courant variable, principalement par la disposition qui met chaque élément du couple en contact avec un liquide particulier, de façon à empêcher la formation de dépôts hétérogènes sur chacun d'eux.

Bornons-nous à décrire les couples les plus usités, ceux de Daniell et de Bunsen.

Le couple électromoteur de la pile de Daniell est représenté dans la figure 407. Il est formé de deux vases, l'un extérieur, en verre ou en faïence, l'autre placé dans le premier, en terre poreuse. Entre les deux vases, on verse de l'eau acidulée (acide sulfurique), et dans le vase poreux une dissolution de sulfate de cuivre. Dans le premier liquide, on plonge une



Fig. 408. — Couple de la pile de Bunsen.

large lame de zinc amalgamé, de forme cylindrique, et dans l'autre un cylindre de cuivre. Voici comment a lieu le dégagement des deux électricités sur le cuivre et le zinc :

L'eau est décomposée; son oxygène attaque le zinc, et il se forme de l'oxyde de zinc, qui se combine avec l'acide sulfurique du liquide du vase extérieur : le zinc prend une tension électrique *négative*. L'hydrogène de l'eau, traversant le vase poreux, attaque le sulfate de cuivre dont l'oxyde se décompose; du cuivre se précipite à l'état métallique sur le cylindre du même métal, qui prend une tension électrique *positive*. Chaque réaction engendre un courant, le premier du zinc à l'acide, le

second du cuivre à la solution qui l'entoure. La force électromotrice du couple de Daniell est la résultante de ces deux forces opposées. Le courant final n'a pas une grande énergie, mais il reste sensiblement constant, si l'on a soin de déposer des cristaux de sulfate de cuivre à l'intérieur du vase poreux. Le zinc et le cuivre conservent leur surfaces intactes, sans aucun dépôt de matières étrangères.

Le *couple de Bunsen* est disposé comme celui de Daniell. Seulement, le cylindre de cuivre est remplacé par un cylindre



Fig. 409. — Pile formée de cinq éléments Bunsen.

de charbon de cornue, et la solution de sulfate de cuivre par de l'acide azotique étendu. Le couple de Bunsen est préférable au couple de Daniell au point de vue de l'énergie du courant, mais il lui est inférieur au point de vue de la constance.

En réunissant plusieurs couples semblables par leurs pôles opposés, on forme des piles de Daniell ou de Bunsen, dont l'énergie est proportionnelle au nombre des éléments ainsi réunis. Le pôle négatif se trouve dans les deux piles sur le zinc du dernier élément, et le pôle positif sur le dernier cuivre dans la pile de Daniell, ou sur le dernier charbon dans la pile de Bunsen, comme le montre la figure 409.

§ IV. EFFETS PHYSIQUES, CHIMIQUES ET PHYSIOLOGIQUES DES PILES.

Maintenant, nous allons décrire quelques-uns des plus remarquables parmi les phénomènes auxquels donne lieu la pro-

duction de l'électricité à basse tension, c'est-à-dire de l'électricité qui prend naissance dans les piles, sous l'influence des réactions chimiques. Chaleur, lumière, combinaisons et décompositions chimiques, secousses nerveuses ou effets physiologiques, tels sont les divers ordres de phénomènes que nous allons voir se manifester, quand fonctionne le merveilleux appareil dont Volta, il y a soixante-huit ans, a doté la science.

Les effets calorifiques des piles sont beaucoup plus intenses que ceux qu'on obtient par la décharge des appareils électriques à haute tension. Voici quelques-uns des phénomènes de ce genre les plus remarquables.

Si l'on ferme le circuit d'un seul couple de Wollaston, en faisant communiquer les réophores à l'aide d'un fil métallique de faible diamètre et de quelques centimètres de longueur, le fil s'échauffe sous l'influence du courant qui le traverse; bientôt, on le voit rougir, puis se fondre ou se volatiliser. Avec une pile de 21 éléments Wollaston, on a pu fondre des fils de platine de 5 millimètres de diamètre sur 7 centimètres de longueur. Les piles à courant constant sont plus puissantes encore : avec 50 éléments Bunsen, des fils de fer ou d'acier, de plus de 30 centimètres de longueur et de la grosseur d'une aiguille à tricoter, brûlent en faisant jaillir de tous côtés des étincelles brillantes. La grande étendue des éléments a plus d'influence sur l'intensité des effets calorifiques que le nombre des couples employés. C'est avec des éléments d'une grande surface que Davy a obtenu la fusion de feuilles de divers métaux, et observé les curieux phénomènes de coloration qui proviennent de la combinaison des métaux avec l'oxygène de l'air. Le fer brûle avec une lumière rouge; le zinc donne une flamme d'un blanc bleuâtre; celle de l'or est jaune; de l'argent, blanche avec une teinte verdâtre sur les bords; du cuivre, verte; de l'étain, pourpre; du plomb, jaune. Seul, le platine fond, sans s'oxyder; il tombe en gouttes d'un blanc éblouissant.

Nous avons vu que les différents métaux ne sont pas éga-

lement bons conducteurs de l'électricité. Ce sont ceux qui offrent au courant la plus grande résistance, qui s'échauffent le plus : de deux fils d'égal diamètre, formés de métaux différents, l'un devient incandescent, l'autre reste obscur, et celui-ci est toujours formé du métal le meilleur conducteur. On met ce fait en évidence, en formant une chaîne métallique de chaînons qui sont alternativement en argent et en platine, et en attachant les deux extrémités de la chaîne aux réophores d'une pile. Dès que le courant passe, on voit le platine rougir, devenir incandescent et même fondre, tandis que l'argent reste obscur. C'est qu'en effet la conductibilité de ce dernier métal pour l'électricité est 100, tandis que celle du platine est seulement égale à 8. C'est pour la même raison, c'est-à-dire à cause de la différente résistance qu'ils offrent au passage d'un même courant, que deux fils d'un même métal et d'inégal diamètre s'échauffent inégalement. Le plus gros, offrant une résistance moindre, s'échauffe moins que le plus petit.

Quand un fil métallique rougi par le courant voltaïque est plongé dans l'eau, l'incandescence cesse; et cela n'a rien que de très-naturel, puisqu'il cède une partie de sa chaleur au liquide. Mais une expérience curieuse de Davy prouve que ce phénomène a encore une autre cause : ayant fait rougir par la pile un fil métallique, il refroidit une portion du fil en le touchant avec un morceau de glace : aussitôt la partie non touchée fut portée au blanc éblouissant et fondit. Voici l'explication qu'on donne de ce fait. Le refroidissement diminue la résistance du fil, et augmente l'intensité du courant, laquelle alors devient assez énergique pour fondre la portion du fil que l'intensité première ne faisait que rougir. Ainsi donc, dans le cas du fil plongé entièrement dans l'eau, et dont l'incandescence cesse, le phénomène est complexe : il y a refroidissement par le contact de l'eau, diminution de la résistance du fil et accroissement de l'intensité du courant; et ces deux dernières causes produisent des effets contraires.

Les piles sont des producteurs d'électricité à basse tension. Il n'est donc pas étonnant que la réunion des réophores d'une pile chargée ne produise pas d'étincelle, ou, du moins, n'en donne qu'une fort petite. Mais si l'on emploie une pile très-puissante, composée d'un très-grand nombre d'éléments, et si, au lieu de fermer le circuit en mettant les fils en contact, on laisse entre leurs extrémités un petit intervalle, on voit jaillir des étincelles très-rapprochées, qui forment même une lumière continue, si les deux fils sont terminés par deux cônes de charbon. C'est à cette lumière continue qu'on donne le nom d'*arc voltaïque*. Davy, à l'aide d'une pile de 2000 couples dont chacun avait 4 décimètres carrés de surface, obtint une lumière éblouissante qui jaillissait d'une façon continue dans l'intervalle des deux pointes de charbon. Cet intervalle n'était d'abord que d'un demi-millimètre; mais, une fois la lumière produite, il put écarter les charbons jusqu'à 11 centimètres. Il vit alors un phénomène d'une grande beauté. La lumière électrique s'étendait entre les deux électrodes dans la forme d'un arc convexe vers le haut, et d'un éclat si intense, que l'œil en pouvait à peine supporter l'éclat. Dans le vide, la longueur de l'arc est plus grande que dans l'air. Depuis Davy, la production de l'arc voltaïque a été rendue plus facile, grâce aux appareils d'induction que nous décrirons dans un prochain chapitre : on est parvenu à l'utiliser pour l'éclairage des phares. L'arc développe une chaleur d'une intensité extrême : les métaux y fondent comme de la cire dans la flamme d'une lampe. Les corps les plus réfractaires ont été fondus et volatilisés par M. Despretz, d'abord à l'aide d'une pile de 600 couples, puis par l'emploi des appareils d'induction. Les oxydes de zinc et de fer, la chaux, la magnésie, l'alumine furent réduits en globules; du graphite, volatilisé, déposa sur les électrodes une poussière qui, examinée au microscope, fut reconnue comme formée de très-petits cristaux de forme octaédrique; avec cette poudre on put polir des rubis, d'où l'on a conclu que le graphite qui est, comme le diamant, du

carbone pur, s'était cristallisé sous l'influence de la chaleur intense de l'arc, et transformé en très-petits diamants.

Les effets chimiques de la pile offrent le plus haut intérêt. Nous n'en citerons que quelques-uns.

La décomposition de l'eau est un des plus importants. Pour l'effectuer on emploie l'appareil que représente la figure 410 et qui porte le nom de *voltamètre*, parce que les quantités d'eau décomposée dans un temps donné par des courants voltaïques servent de mesure aux intensités de ces courants. C'est un vase en verre, dont le fond garni de mastic laisse passer

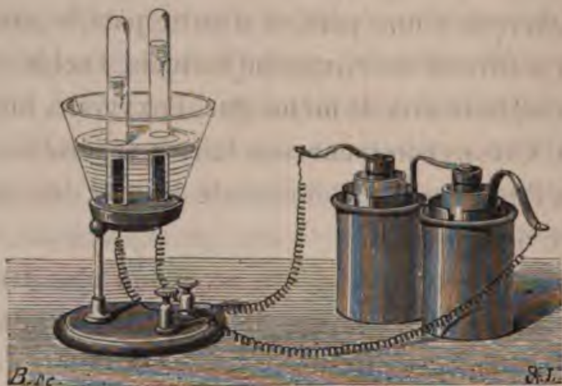


Fig. 410. — Décomposition de l'eau par la pile.

deux fils de platine, qui vont se réunir aux extrémités des réophores d'une pile. Le vase est rempli d'eau additionnée de quelques gouttes d'acide sulfurique, ce qui rend le liquide meilleur conducteur. Deux cloches graduées pleines d'eau recouvrent les lames de platine. Aussitôt que le courant passe, on voit des bulles de gaz se dégager autour des lames et monter à la partie supérieure de chaque cloche. L'un de ces gaz est l'hydrogène, l'autre l'oxygène, et le volume du premier est toujours double du volume du second. De plus, c'est toujours autour de la lame qui est rattachée au réophore du pôle positif qu'a lieu le dégagement de l'oxygène, tandis que l'hydrogène se dégage au pôle négatif.

A l'aide de la pile, Davy est parvenu à décomposer les

oxydes des métaux alcalins, la potasse par exemple, et il en est résulté la découverte d'un nouveau métal, le potassium. Un grand nombre d'autres composés chimiques, acides et bases, ont été résolus en leurs éléments par l'influence du courant voltaïque, et la chimie s'est trouvée en possession d'un nouveau et puissant moyen d'analyse. Donnons encore un exemple de décomposition, celle d'un sel métallique : nous verrons plus tard l'importance des applications que l'industrie a su faire de ce mode d'action de l'électricité.

Considérons le sel qu'on nomme en chimie le *sulfate de cuivre*. C'est un composé de deux combinaisons binaires : l'*acide sulfurique* d'une part, et d'autre part le *protoxyde de cuivre*. Du soufre et de l'oxygène forment l'acide sulfurique ; du cuivre combiné avec le même gaz, l'oxygène, forme l'oxyde métallique. Voyons comment va se faire la séparation de ces éléments sous l'influence de l'électricité qui se dégage entre les réophores d'une pile.

On plonge, dans un vase, qui renferme une dissolution de sulfate de cuivre, deux lames de platine attachées aux réophores de la pile. Aussitôt on voit, sous l'influence du courant électrique, des bulles d'oxygène se dégager autour de la lame qui correspond au pôle positif — c'est ce qu'on nomme l'*électrode positive* — et du cuivre se déposer à l'état métallique à la surface de la lame qui forme l'*électrode négative*. Le sel a été décomposé ; sa base, séparée de l'acide, s'est elle-même décomposée en oxygène et en cuivre : quant à l'acide sulfurique devenu libre, il s'est porté vers l'électrode positive. C'est ce dont on s'assure en sondant avec des bandes de papier de tournesol divers points de la solution, et l'on voit que la teinte rouge du papier réactif est la plus forte dans le voisinage de l'électrode positive.

Les phénomènes de décomposition chimique par les courants voltaïques sont extrêmement nombreux et complexes ; il faudrait un volume pour les décrire. Bornons-nous à signaler un fait singulier qui accompagne toujours une action *électro-*

lytique — c'est une expression déduite du mot *électrolyse* par lequel Faraday a désigné toute décomposition par la pile. — Quand les électrodes ont été employées pendant quelque temps, si on les retire de la dissolution saline, et qu'on les plonge dans l'eau pure, en mettant chacune d'elles en communication avec les fils d'un galvanomètre, on reconnaît à l'aide de cet instrument, que nous décrirons bientôt, qu'un courant a lieu en sens contraire du courant primitif, c'est-à-dire de l'électrode négative à l'électrode positive à travers le liquide. On dit alors que les électrodes sont *polarisées*. Le courant secondaire dont nous parlons, n'est d'ailleurs que temporaire; il est dû à l'accumulation sur les électrodes des dépôts produits par l'électrolyse, et il cesse dès que ces dépôts se trouvent épuisés par l'effet des nouvelles réactions chimiques engendrées sous son influence.

Les commotions ou secousses nerveuses, causées par le passage du courant d'une pile à travers les organes de l'homme ou des animaux, sont d'autant plus fortes que la pile est formée d'un plus grand nombre de couples. L'effet produit ne dépend que de la tension de la pile, tension qui croît avec le nombre des éléments, sans que la surface de ceux-ci puisse suppléer à leur nombre. Il est dangereux de s'exposer à recevoir la commotion d'une pile puissante; et l'on sait qu'avec la pile de 2000 couples de l'Institut de Londres, des chevaux et des bœufs ont été tués sur le coup. Gay-Lussac se ressentit plus d'une journée de la secousse violente qu'il reçut en touchant les deux réophores d'une pile à auge de 600 couples. C'est au moment où l'on ferme le circuit que la sensation a lieu avec le plus de force : alors les bras sont secoués, et la poitrine même ébranlée, mais on n'éprouve plus ensuite qu'une sorte de frémissement dans les muscles des bras et des mains. Enfin quand on rompt la communication, on ressent une nouvelle secousse, d'ailleurs beaucoup plus faible que la première.

Il y a lieu, du reste, de distinguer deux sortes d'effets physiologiques de la pile : la simple contraction musculaire, sans

douleur, et une vive et douloureuse sensation, sans contraction. On sait aujourd'hui que les nerfs de la vie de relation se divisent en nerfs sensibles et en nerfs moteurs : les premiers ont pour fonction de transmettre les sensations aux centres nerveux, cerveau et moelle épinière, tandis que les nerfs moteurs, exécutant pour ainsi dire les ordres qui viennent du cerveau lui-même, ont pour fonction de donner le mouvement aux muscles. Ces deux espèces de nerfs s'insèrent par deux ordres de racines, les unes motrices, les autres sensibles, et restent unis dans un certain intervalle ; puis ils se séparent et se ramifient en deux branches, l'une portant la sensibilité aux organes, l'autre leur donnant le mouvement. Or, si l'on ferme le circuit après avoir posé l'un des réophores sur le faisceau commun des deux ordres de nerfs, il y a à la fois contraction et sensation douloureuse dans l'animal soumis à l'expérience. Mais il y a seulement contraction, si l'on a touché les ramifications du nerf moteur, et seulement douleur, si ce sont les ramifications sensibles qui ont été d'abord touchées par le fil.

Les effets physiologiques de la pile ont été l'objet de nombreuses et très-intéressantes expériences, soit sur les animaux vivants, soit sur les animaux morts. Galvani et son parent Aldini, professeur à Bologne, ont eu l'honneur de commencer cette étude si féconde de l'influence de l'électricité sur les animaux. Ils ont montré que le passage du courant produit dans les muscles des animaux morts des contractions, simulant d'une façon effrayante les mouvements qui s'effectuent pendant la vie. Les expériences d'Aldini sur les cadavres de deux criminels, décapités à Bologne en 1802, sont particulièrement célèbres. On cite aussi celles du docteur Andrew Ure sur le cadavre d'un supplicié, une heure après qu'il eût été enlevé du gibet. L'un des nerfs du sourcil fut mis en communication avec un des fils de la pile ; le talon avec l'autre pôle. Le visage du criminel se contracta d'une façon si hideuse, qu'un des assistants s'évanouit. Aucune expression

ne saurait dépeindre l'horreur des assistants pour la scène terrible qui résulta de cette expérience.

L'action de la pile sur les êtres vivants n'est pas moins curieuse ; et ses effets nous intéressent bien davantage, depuis qu'on a reconnu leur influence bienfaisante pour la guérison de certaines maladies, principalement des affections nerveuses. Nous terminerons en disant que l'action du courant voltaïque sur les organes des sens peut déterminer précisément les sensations propres à chacun d'eux. En excitant les nerfs optiques on produit la sensation de la lumière, celle du son, si ce sont les nerfs de l'ouïe qui ont été touchés.

CHAPITRE V.

ÉLECTRO-MAGNÉTISME ET INDUCTION.

§ I. ACTION D'UN COURANT SUR L'AIGUILLE AIMANTÉE. — LOIS D'AMPÈRE.

Vingt ans après la découverte de la pile par Volta, un fait nouveau d'une importance capitale fut mis au jour par Œrstedt, physicien suédois, professeur à l'université de Copenhague : ce savant reconnut que le courant électrique agit sur l'aiguille aimantée. Depuis longtemps, on soupçonnait l'existence d'une relation entre les phénomènes magnétiques et ceux de l'électricité; on avait remarqué les perturbations éprouvées par la boussole sur les navires que frappe la foudre ou dont les mâts présentent le phénomène électrique connu sous le nom de feu Saint-Elme; on savait que les décharges des batteries agitent les aiguilles aimantées placées dans le voisinage des appareils. Mais ces faits ne donnaient que de vagues idées sur la corrélation dont il s'agit.

En 1820, l'année même où Œrstedt fit sa découverte, Ampère étudia et formula les lois de cette action, et montra en outre que les courants agissent eux-mêmes sur les courants. Enfin, Arago découvrit l'aimantation du fer doux et celle de l'acier sous l'influence du courant de la pile. Les expériences de ces trois savants furent autant de points de départ d'une multitude d'expériences nouvelles, qui changèrent en peu de temps la face de cette partie de la science, en démontrant que le magnétisme et l'électricité sont des manifestations diverses d'une même cause. Nous verrons plus tard que

les mêmes découvertes qui ont révélé la véritable nature du magnétisme et fait faire à la théorie tant de progrès, n'ont pas été moins fécondes en applications ingénieuses et utiles.

Revenons à l'expérience d'Œrstedt.

Considérons une aiguille aimantée suspendue sur un pivot, et mobile dans un plan horizontal. Nous savons qu'elle se place alors d'elle-même dans le méridien magnétique, faisant un angle constant avec la ligne méridienne géographique nord-sud. Plaçons parallèlement à l'aiguille, et à une petite distance au-dessus, un fil métallique dont les extrémités sont reliées aux réophores d'une pile. Aussitôt que le courant passe, l'aiguille est déviée de sa position; elle quitte le méridien

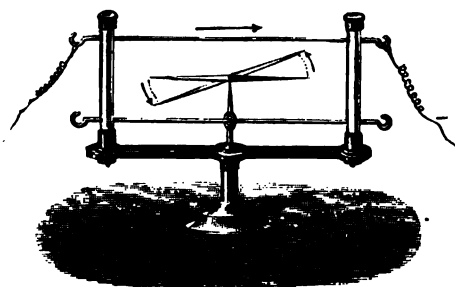


Fig. 411. — Action d'un courant electrique sur l'aiguille aimantée.

magnétique et se met en croix avec le courant. Au lieu de placer le fil au-dessus de l'aiguille aimantée, supposons qu'on le place à la même distance au-dessous: l'aiguille se retourne bout à bout, se plaçant de nouveau en croix avec le courant. Répétons les deux mêmes expériences en changeant le sens du courant voltaïque : s'il allait d'abord du sud au nord, faisons-le marcher du nord au sud. L'aiguille dévie encore et, comme précédemment, se place en croix avec le courant, mais dans des directions précisément opposées à celles qu'elle avait prises sous l'influence du courant direct.

Enfin si, au lieu de disposer le fil parallèlement à l'aiguille, on le place perpendiculairement au plan horizontal, en face de l'un ou de l'autre pôle, on verra l'aiguille subir encore les

mêmes déviations, correspondant aux quatre dispositions nouvelles que l'on peut donner au courant voltaïque : de haut en bas, de bas en haut, et en face soit du pôle austral, soit du pôle boréal de l'aiguille.

Telles sont les expériences d'Œrstedt. Voici maintenant comment Ampère est parvenu à formuler en un énoncé unique la loi de ces déviations. Il conçut l'idée ingénieuse de personnifier le courant, de le figurer par un personnage couché le long du courant, et dont la face est, dans toutes les positions possibles, toujours tournée vers le centre de l'aiguille. Le courant qui marche, comme on sait, du pôle positif de la pile au pôle négatif à travers le fil, est supposé entrer par les pieds du

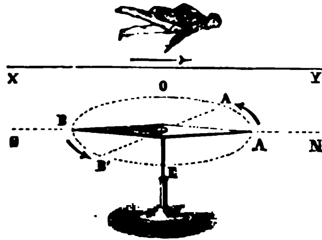


Fig. 412. Déviation du pôle austral vers la gauche, sous l'influence d'un courant supérieur.

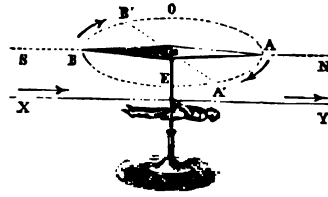


Fig. 413. Déviation à gauche du courant. Courant inférieur.

personnage et sortir par sa tête. Cela posé, le courant se trouve avoir une droite et une gauche, qui sont celles du personnage lui-même; alors, voici l'énoncé simple par lequel Ampère a réuni tous les cas différents que fournit l'expérience d'Œrstedt :

Quand un courant électrique agit sur l'aiguille aimantée, le pôle austral de l'aiguille — qui est toujours celui qui se dirige vers le nord — *est dévié vers la gauche du courant.*

Ainsi le courant marche-t-il parallèlement à l'aiguille et du sud au nord? C'est le cas des deux figures 412 et 413. Dans le cas du courant, supérieur, le pôle austral A est dévié en A' à gauche du courant, c'est-à-dire vers l'ouest; si le courant passe au-dessous de l'aiguille, c'est toujours en A' à la gauche du courant que dévie le pôle austral A, mais alors ce pôle

marche vers l'est. Change-t-on la direction du courant, sans qu'il cesse d'être parallèle à l'aiguille, c'est-à-dire, le fait-on marcher du nord au sud, c'est à l'est que déviera le pôle austral, dans le cas du courant supérieur, à l'ouest dans le cas du courant placé au-dessous de l'aiguille. Enfin, quand le courant est vertical, il peut être ascendant ou descendant, et disposé soit vis-à-vis le pôle boréal de l'aiguille, soit vis-à-vis son pôle austral. Dans le cas que représente la figure 414, on voit le pôle austral dévier à l'est, c'est-à-dire à la gauche du courant. Nous laissons au lecteur le soin de trouver le sens de la déviation de l'aiguille dans les autres cas : c'est chose facile, grâce à l'énoncé d'Ampère.

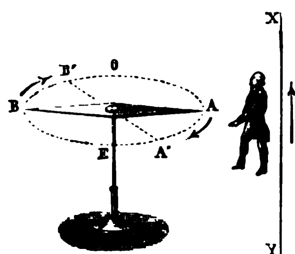


Fig. 414. Déviation à gauche du courant. — Courant vertical.

Les lois qui régissent ces déviations ont été étudiées par Biot et Savart, et par Laplace : retenons seulement ce fait, que l'influence du courant dépend de son intensité, et, par suite, de la surface des couples de la pile employée; il diminue à mesure que la distance à l'aiguille augmente. Il ne faut pas oublier qu'en présence d'un courant voltaïque, l'aiguille se trouve soumise à la fois à deux influences, celle du courant lui-même, et celle de la Terre, qui agit sur l'aiguille comme un aimant. Les déviations observées sont donc un effet résultant de ces deux actions simultanées. Si, par un moyen quelconque, on parvient à rendre la direction d'une aiguille aimantée indépendante de l'action de la Terre — c'est alors ce qu'on nomme une aiguille *astatique* — le courant dévie toujours l'aiguille à angle droit, quelle que soit son intensité. La déviation indique alors seulement la présence du courant, sans prouver rien sur son énergie.

Nous allons voir maintenant comment on a utilisé l'action des courants électriques sur l'aiguille aimantée, pour construire des appareils qui servent à la fois et à constater la présence des courants les plus faibles, et à mesurer leur intensité.

§ II. MULTIPLICATEUR ET GALVANOMÈTRE.

Décrivons d'abord l'appareil auquel on donne le nom de *multiplicateur de Schweigger*, du nom de son inventeur.

C'est un cadre en bois (fig. 415) sur lequel un fil de cuivre s'enroule un grand nombre de fois. Le fil métallique est recouvert dans toute sa longueur d'une substance isolante, gutta-percha, soie, coton, de sorte qu'un courant électrique, entrant par l'une des extrémités du fil et sortant par l'autre, ne peut passer d'une spire à la suivante sans en avoir parcouru toute l'étendue; en un mot il est obligé de parcourir toutes les spires successives. Si l'on place le cadre verticalement sur un de ses côtés, dans le plan du méridien magnétique, et si l'on dispose à l'intérieur une aiguille aimantée librement suspendue sur un pivot vertical, on aura un instrument très-propre à accuser par les déviations de l'aiguille, l'existence d'un courant électrique, si faible qu'il soit. Il suffira pour cela de rattacher les extrémités du fil multiplicateur aux deux réophores de la pile ou de tout autre circuit voltaïque. Dès que le circuit sera fermé, la présence du courant se manifestera par une déviation plus ou moins forte de l'aiguille.



Fig. 415. — Multiplicateur de Schweigger.

Analysons maintenant ce qui se passe, et voyons comment l'action du courant se trouve multipliée par la disposition que nous venons de décrire. Considérons un des tours du fil autour du cadre : le courant passe de M en N, puis en Q, en P, et à partir de R s'éloigne de l'aiguille. Or, si l'on se rapporte à l'énoncé d'Ampère, on verra que chacune des quatre portions du courant tend à dévier le pôle austral a en a', vers l'est par conséquent, ou, si l'on veut, en avant de la figure; chacune d'elles

agit comme un courant isolé, ou mieux, comme une portion de courant indéfini voisine de l'aiguille. La déviation totale sera donc plus forte que si le courant ne faisait que suivre l'un des côtés du rectangle. Or, à la spire suivante, le courant agit de nouveau de la même manière, et il en est de même pour toutes les spires successives, de sorte que son influence sur l'aiguille aimantée se trouve multipliée par le nombre des tours du fil. De là, le nom de *multiplicateur* donné à l'instrument.

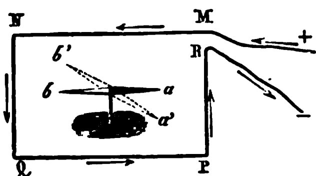


Fig. 416. — Actions concourantes des diverses portions du fil dans le multiplicateur.

L'aiguille aimantée est ici, comme nous l'avons déjà dit, soumise à deux forces, l'action directe de la Terre, en vertu de laquelle elle se place dans le méridien magnétique, et l'action du courant, qui tend à lui faire prendre une position perpendiculaire à la première. La déviation de l'aiguille est produite par la résultante de ces deux actions. Pour rendre cette déviation plus forte, et donner une sensibilité plus grande au multiplicateur, Nobili a eu l'idée de substituer à l'aiguille aimantée un système de deux aiguilles aimantées parallèles, mais fixées à un même axe, de façon que leurs pôles de même nom soient placés en sens inverse. L'axe étant suspendu à un fil de soie sans torsion, si les aiguilles ont la même force magnétique, leur système sera *astatique*, c'est-à-dire restera en équilibre, quel que soit l'angle qu'il fasse avec le méridien. Un système rigoureusement astatique ne remplirait pas le but qu'on se propose, qui est de mesurer l'intensité des courants par la déviation, puisque alors la déviation atteindrait toujours le maximum de 90°, quelle que soit la faiblesse du courant. Mais si l'une des aiguilles, l'inférieure par exemple, est un peu plus aimantée que la supérieure, le système continuera à être influencé par la Terre; mais cette action sera très-faible, et dès lors, l'action des courants par l'intermédiaire du multiplicateur sera, au contraire, considérable.

L'introduction des aiguilles compensées dans le multiplicateur de Schweigger a conduit Nobili à la construction du *galvanomètre*, l'appareil le plus sensible pour la constatation de l'existence et du sens des courants électriques les plus faibles. Voici comment on se sert de cet instrument (fig. 418).

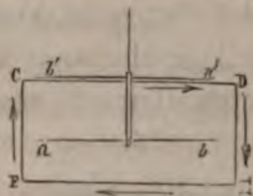


Fig. 417. — Système de deux aiguilles astatiques.

Le cadre en ivoire autour duquel s'enroule le fil multiplicateur, et qu'on voit au-dessous du cadran, peut se mouvoir dans un plan horizontal, à l'aide d'une vis extérieure. On commence par l'amener dans un plan tel que le zéro de la graduation du cadran corresponde à l'une des extrémités de l'aiguille. Alors on est sûr que les spires du fil de cuivre sont parallèles aux deux aiguilles du système. Dans son mouvement, le cadre a entraîné une lame rectangulaire d'ivoire qui porte deux boutons de laiton, à chacun desquels aboutit l'une des extrémités du fil du multiplicateur. C'est à ces boutons qu'on attache les réophores du courant dont on cherche à constater le sens et l'intensité. Dès que le circuit est fermé, et que, dès lors, le courant parcourt les spires, on voit l'aiguille supérieure dévier à droite ou à gauche de sa position d'équilibre; le sens de cette déviation indique, d'après la loi d'Ampère, le sens du courant. L'appareil est muni de vis calantes, afin qu'on

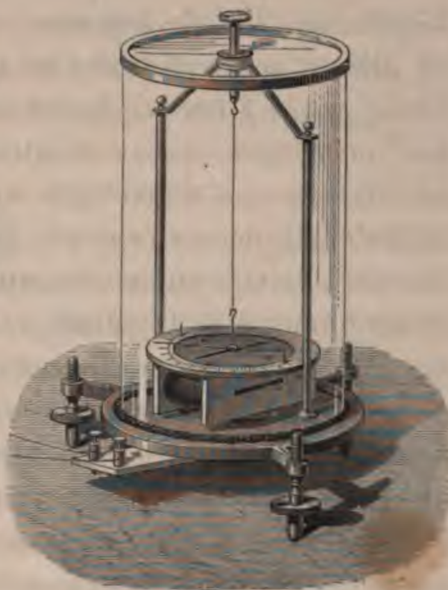


Fig. 418. — Galvanomètre.

puisse le placer bien horizontalement, et une cloche de verre sert à protéger le fil suspenseur et les aiguilles elles-mêmes contre les agitations de l'air extérieur.

Quant à l'intensité du courant, elle se mesure par l'angle que fait l'aiguille avec le méridien magnétique, ou mieux par l'arc que l'une de ses extrémités a parcouru à partir du zéro de la graduation. On a reconnu que, si la déviation ne dépasse pas 20°, elle est sensiblement proportionnelle à l'intensité du courant.

§ III. ACTION DES COURANTS SUR LES COURANTS. — THÉORIE DU MAGNÉTISME.

Nous venons de voir quelle est l'action des courants voltaïques sur l'aiguille aimantée, et comment cette influence a été utilisée pour construire un appareil d'une sensibilité extrême, propre à faire connaître le sens et l'intensité d'un courant quelconque. Disons maintenant que les aimants ont sur les courants une action égale à celles qu'ils subissent eux-mêmes, mais de sens opposé. Ainsi, quand on place un fort barreau aimanté, AB, dans une position horizontale au-dessus ou au-dessous d'un fil métallique formant un circuit voltaïque (fig. 419), et libre de tourner autour des points de suspension, on voit aussitôt le fil se diriger en croix avec le courant, de manière que le pôle austral du barreau se trouve toujours à la gauche de la portion du courant qui en est le plus rapprochée. Qu'on vienne à changer le sens du courant, par l'interversion des réophores qui aboutissent aux deux extrémités du fil, à l'instant le courant fait sur lui-même une rotation de 180°, laquelle amène son plan dans une position perpendiculaire au barreau aimanté : le pôle austral de ce dernier est donc encore, d'après l'énoncé d'Ampère, à la gauche du courant.

Arrivons maintenant à la belle découverte d'Ampère qui suivit de près, comme nous l'avons dit, celle d'Œrstedt, à l'action des courants voltaïques les uns sur les autres. Nous

nous bornerons à énoncer les lois principales qui régissent l'influence réciproque des courants, lois dont la vérification expérimentale est facile, dans les nombreux cas particuliers qu'elles comprennent. Ampère à démontré que :

1° *Deux courants parallèles, qui marchent dans la même direction, s'attirent; ils se repoussent s'ils marchent en sens contraire;*

2° *Deux courants non parallèles s'attirent, si tous deux s'approchent ou s'éloignent à la fois du sommet de l'angle formé par leurs directions; ils se repoussent, si l'un des courants s'approche du sommet de l'angle, tandis que l'autre s'en éloigne.*

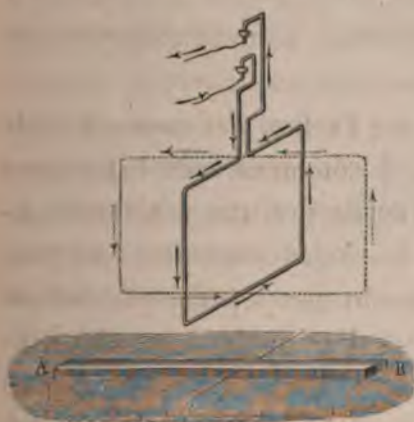


Fig. 419. — Action d'un courant sur un courant

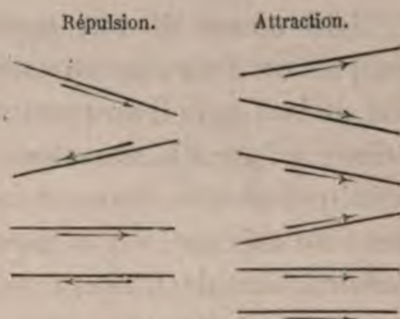


Fig. 420. — Loi des attractions et répulsions d'un courant par un courant.

La figure 420 représente les trois cas d'attraction et les deux cas de répulsion, que mentionnent ces lois.

Ainsi donc, d'une part, les courants électriques agissent sur les aimants, les aimants agissent sur les courants; d'autre part, les courants agissent les uns sur les autres. De là, à assimiler les aimants aux courants, il n'y avait qu'un pas; Ampère le franchit, mais sans cesser d'appeler au secours de la théorie le contrôle de l'expérience. Il découvrit que la Terre elle-même agit sur les courants, que si l'on abandonne à lui-même un équipage rectangulaire semblable à celui de la figure 419

et parcouru par un courant électrique, l'appareil tourne autour de son axe vertical et vient se placer spontanément en croix avec le méridien magnétique; c'est la portion ascendante du courant qui se porte à l'ouest, la portion descendante à l'est. M. Pouillet, à l'aide de dispositions fort ingénieuses, a fait voir qu'un courant vertical isolé, mobile autour d'un axe qui lui est parallèle, se transporte de lui-même à l'ouest ou à l'est magnétique, selon qu'il est ascendant ou descendant, tandis que l'action de la Terre sur les branches horizontales de l'appareil d'Ampère est nulle. S'emparant de ces faits, Ampère a construit des appareils astatiques, c'est-à-dire indifférents à l'action du globe terrestre. Puis, faisant alors agir sur eux un courant fixe, placé horizontalement dans une direction perpendiculaire au méridien magnétique, de l'est à l'ouest, il a vu que l'action de ce courant était précisément la même que l'action de la Terre. Il en conclut que l'action magnétique de la Terre sur l'aiguille aimantée est due à des courants électriques qui circulent incessamment, sous l'horizon, perpendiculairement au méridien magnétique, et dont le sens est celui de l'orient à l'occident. Tous ces courants, quel qu'en soit le nombre, peuvent être considérés comme composant un courant unique, et l'expérience montre que, sous nos latitudes, sa position est située vers le sud.

Poursuivant ces belles généralisations, Ampère a fait voir qu'un aimant peut être assimilé à un assemblage de courants circulaires, verticaux, parallèles entre eux et de même sens. Un tel assemblage, en effet — l'expérience va nous le démontrer—étant suspendu librement de manière à pouvoir tourner dans un plan horizontal, soumis à l'action de la Terre, se place de lui-même dans le méridien magnétique : il se conduit de la même façon qu'une aiguille aimantée. Voici comment Ampère a réalisé ce qu'on peut appeler l'*hélice* ou *l'aimant électrique*.

Il prit un fil métallique, et l'enroulant autour d'un cylindre en spires équidistantes, il lui donna la forme que représente la figure 421, ramenant les deux extrémités des fils longitu-

dinalement au-dessus des spires, puis les recourbant de façon que l'ensemble puisse librement tourner autour d'un axe vertical. Cela fait, il rattacha les deux bouts du fil aux réophores d'une pile. Une fois que le courant passe dans le sens marqué par les flèches, le *solénoïde* — c'est le nom donné à l'appareil par Ampère — se place dans une position d'équilibre stable : chaque spire se trouve dans un plan vertical dont la direction est de l'est à l'ouest magnétique ; l'axe du solénoïde coïncide alors avec le méridien magnétique, tout comme le ferait une aiguille aimantée. Si l'on change alors le sens du courant,

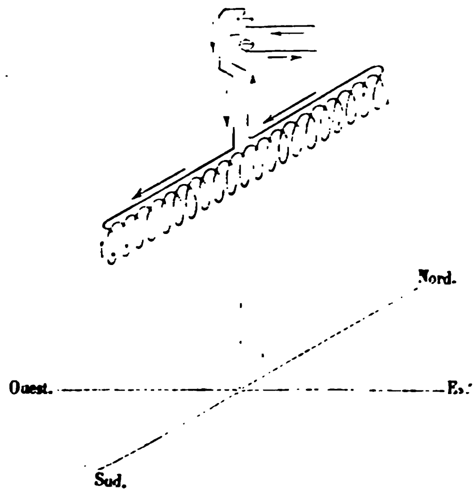


Fig. 421. — Direction d'un solénoïde dans le méridien, sous l'action de la Terre.

on voit le solénoïde se déplacer ; puis, après avoir tourné de 180°, venir se placer dans sa position primitive ; son axe longitudinal est toujours dans le méridien magnétique, seulement il se trouve retourné bout pour bout. Enfin un élément de solénoïde, suspendu de façon à pouvoir tourner librement autour d'un axe perpendiculaire au méridien magnétique, prend une inclinaison qui est précisément égale à celle de l'aiguille aimantée.

Ainsi les aimants ordinaires et les solénoïdes, ou aimants électriques, se conduisent de même sous l'influence de l'action magnétique de la Terre. Mais l'analogie a été poussée plus loin :

Ampère a fait voir que les extrémités ou pôles de deux solénoïdes exercent les uns sur les autres des attractions et des répulsions de même nature que les attractions et les répulsions des pôles des aimants : les pôles de même nom des solénoïdes se repoussent; les pôles de noms contraires s'attirent. Enfin, les mêmes actions se manifestent, si l'on présente le pôle d'un solénoïde à l'un ou à l'autre des deux pôles d'une aiguille aimantée. L'assimilation est complète, et Ampère a pu formuler dans toute sa rigueur sa théorie du magnétisme, théorie qui ramène les phénomènes magnétiques aux phénomènes d'électricité dynamique. Voici un résumé sommaire de cette belle théorie :

Le globe terrestre est incessamment sillonné d'une multitude de courants électriques, engendrés par les actions chimiques qui ont lieu dans son sein. Tous ces courants, de sens et d'intensités probablement divers et variables, produisent sur les aimants le même effet qu'un courant unique, résultant de la composition des courants élémentaires, et circulant de l'est à l'ouest, en sens contraire du mouvement de rotation de la Terre. Une substance magnétique, fer, acier, etc., est de même le siége de courants électriques élémentaires circulant autour de certains groupes d'atomes. Dans le fer doux, et dans les corps magnétiques qui ne sont pas doués du magnétisme polaire, ces courants se trouvent orientés dans tous les sens, de sorte que l'effet résultant est nul. Dans les aimants au contraire, les courants particulaires ont tous la même orientation; par exemple, ils circulent comme l'indiquent les flèches de la figure 422, où l'on voit représentée une section transversale d'un barreau aimanté. Dans les portions voisines ou contiguës, en *b*, *b'*, *a*, *a'*, etc., les courants sont de sens contraire et se détruisent; de sorte que l'effet total se réduit à l'effet extérieur, ce qui revient à considérer le contour de chaque tranche comme étant parcouru par un seul courant. La même chose aura lieu dans toutes les sections, et l'aimant sera constitué comme l'indique la figure 423.

On voit donc, d'après la théorie d'Ampère, que tout aimant peut être considéré comme équivalant à un solénoïde.

Quand aux substances magnétiques, telles que le fer doux, le voisinage d'un aimant leur fait acquérir momentanément le magnétisme polaire, par l'action que les courants du solénoïde exercent sur les courants dont ils sont eux-mêmes le siége. Cette influence modifie l'orientation de ces courants élémentaires, et fait que leur résultat n'est plus nul : ainsi se conçoit l'aimantation par influence. Nous allons voir que l'aimantation permanente s'explique aussi parfaitement dans la

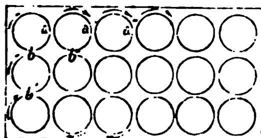


Fig. 422. — Courants particulaires des aimants.

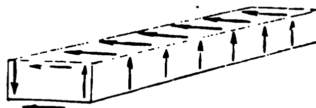


Fig. 423. — Courants résultants à la surface d'un aimant.

théorie d'Ampère. Mais là, c'est l'expérience qui doit nous instruire, en nous révélant des phénomènes du plus haut intérêt.

§ IV. L'ÉLECTRO-AIMANT.

Arago fit, en septembre 1820, peu de temps après les découvertes d'Œrstedt et d'Ampère, l'expérience suivante : il plongea dans une masse de limaille de fer un fil de cuivre qui réunissait les deux pôles d'une pile; en retirant le fil sans interrompre le courant, il le vit recouvert sur toute sa surface de parcelles de limaille, disposées transversalement; dès que le courant était interrompu, les parcelles se détachaient du cuivre et tombaient. Pour s'assurer qu'il s'agissait bien là d'une aimantation temporaire, non de l'attraction d'un corps électrisé pour les corps légers, il substitua à la limaille de fer une substance non magnétique.

et le phénomène n'eut plus lieu. En plaçant des aiguilles de fer doux, puis d'acier trempé, très-près du fil de cuivre et en croix avec ce dernier, il reconnut que l'action du courant les transformait en aiguilles aimantées, ayant leur pôle austral toujours à gauche du courant, résultat conforme aux récentes expériences d'Œrstedt.

Bientôt Arago et Ampère reconnurent que l'aimantation du fer doux ou celle de l'acier se développait avec bien plus d'énergie, en plaçant l'aiguille à l'intérieur d'une hélice électrique. Ils enroulaient le fil réophore d'une pile autour d'un tube de verre; puis, ayant placé dans l'axe de ce dernier l'aiguille à aimanter, ils faisaient passer le courant. L'aimantation se

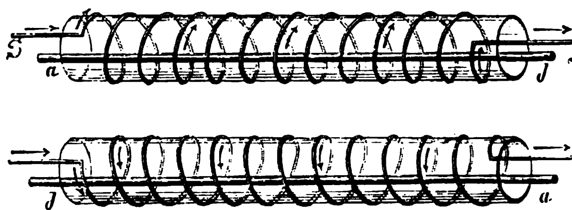


Fig. 424. — Aimantation d'une aiguille d'acier par un solénoïde : hélices dextrorsum et sinistrorsum.

produisait aussitôt; mais, comme on devait s'y attendre, elle était temporaire pour le fer doux, permanente pour l'acier.

On voit, d'après la figure 424, qu'il y a deux manières d'enrouler le fil autour du tube. En supposant le tube horizontal, on peut enrouler le fil en allant de droite à gauche, chaque spire s'enroulant de bas en haut sur la face du tube tournée vers l'opérateur : c'est l'hélice ou le solénoïde *dextrorsum;* ou bien on peut enrouler le fil toujours de la même façon, mais en allant de gauche à droite : c'est l'hélice ou le solénoïde *sinistrorsum.* Si le courant traverse les spires de l'hélice de gauche à droite, comme l'indiquent les flèches, l'aimantation donnera à l'aiguille son pôle austral *a*, à gauche dans l'hélice dextrorsum; le pôle austral sera au contraire à droite dans l'aiguille de l'hélice sinistrorsum. Dans les deux cas, c'est

toujours à la gauche du courant, suivant la loi d'Ampère, que se trouve placé le pôle austral.

Par ce procédé d'aimantation, si simple et si merveilleux, on peut à volonté produire des pôles secondaires sur les barreaux qu'on veut aimanter, ce qu'on nomme, nous l'avons vu plus haut, des *points conséquents*. Il suffit, pour cela, après avoir enroulé le fil dans un sens autour du tube, de l'enrouler dans le sens opposé vis-à-vis chacun des points où doit exister un pôle secondaire. L'hélice totale se trouve ainsi formée d'une hélice dextrorsum suivie d'une hélice sinistrorsum, et ainsi de suite (fig. 425).

Nous avons dit que le fer doux, enveloppé d'une hélice



Fig. 425. — Aimantation par une hélice : production des points conséquents.

magnétisante prend une aimantation temporaire. La force magnétique ainsi développée est d'autant plus puissante que le fer est plus homogène et plus pur, et que le nombre des spires de l'hélice est plus considérable. Pour réaliser facilement cette dernière condition, on entoure le fil métallique d'une enveloppe isolante, comme dans le multiplicateur de Schweigger, par exemple de fil de soie. On l'enroule alors autour du morceau de fer doux, en serrant les tours autant qu'on veut, de manière à obtenir un très-grand nombre de spires. On a alors ce qu'on appelle un *électro-aimant*, c'est-à-dire un aimant dont la puissance magnétique subsiste pendant la durée du passage du courant de la pile, et cesse dès que le courant est interrompu.

On donne aux électro-aimants la forme d'un cylindre recourbé en fer à cheval, dont chaque branche est recouverte par une portion de fil (fig. 426). Les hélices y paraissent enroulées en sens opposé, mais le sens de l'enroulement est en

réalité le même dans les deux branches, si l'on suppose le cylindre de fer doux redressé. Aux deux extrémités se trouvent



Fig. 426. — Électro-aimant en fer à cheval.



Fig. 427. — Électro-aimant.

donc, dès que le courant passe, deux pôles de noms contraires. On fait aussi des électro-aimants avec deux cylindres de fer

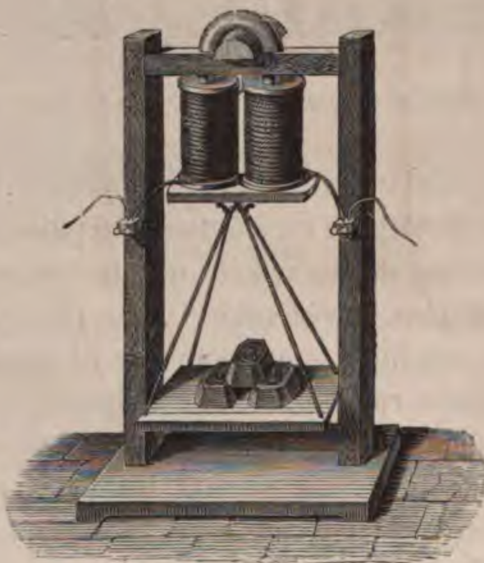


Fig. 428. — Électro-aimant avec sa charge.

doux parallèles, réunis d'un côté par une lame de fer, de l'autre par une lame de cuivre (fig. 427). La puissance d'un électro-aimant ne dépend pas seulement du nombre des tours du fil conducteur du courant, mais aussi de l'intensité de ce dernier et des dimensions du fer doux qui le forme. L'électro-aimant

que M. Pouillet a fait construire pour la Faculté des sciences de Paris est capable de supporter une charge de plusieurs milliers de kilogrammes.

Les électro-aimants permettent de faire plusieurs expériences curieuses, par exemple de produire une chaîne magnétique, en disposant, au-dessous des pôles, un amas de substances magnétiques, de la limaille de fer, des clous, etc. Aussitôt que le courant passe, les petits corps sont attirés par les pôles, s'aimantent par influence et s'enchevêtrent comme le montre la

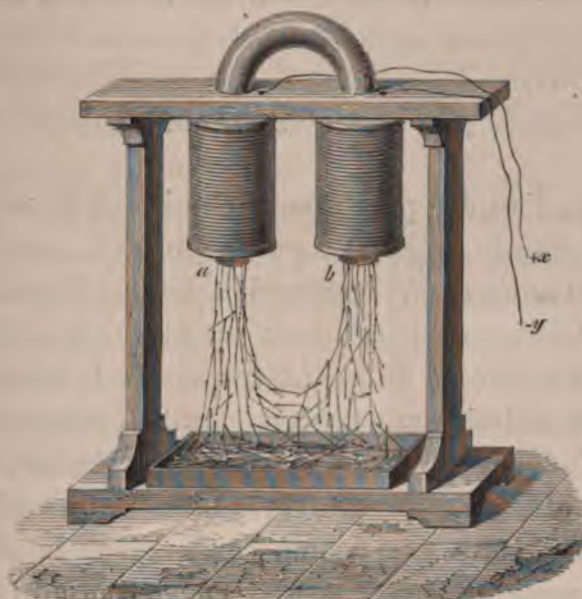


Fig. 429. — Chaîne magnétique.

figure 429. Dès que le circuit est ouvert, la chaîne se rompt, et tous les fragments tombent à la fois.

La promptitude avec laquelle, sous l'influence de l'électricité, le fer doux s'aimante, puis perd son aimantation dès que le courant cesse, a suscité de nombreuses et importantes applications de l'électro-aimant. Nous verrons ailleurs qu'on a utilisé cette propriété pour construire des machines motrices, peu puissantes il est vai, mais précieuses pour les travaux qui exigent précision et régularité. Mais c'est surtout dans la

télégraphie électrique que l'électro-aimant joue un rôle capital, bien propre à montrer combien les spéculations de la théorie la plus élevée touchent de près aux applications pratiques de la plus haute utilité sociale. Plus tard nous rendrons justice aux inventeurs des systèmes qui ont réalisé ce mode de communication, pour ainsi dire instantané, de la pensée; maintenant ce sont les noms de Volta, d'Ampère, d'Arago qu'il faut signaler à la reconnaissance du monde civilisé, car c'est à ces hommes illustres qu'on doit la découverte des principes qui ont rendu possible cette invention merveilleuse.

§ V. PHÉNOMÈNES D'INDUCTION.

Faraday, l'un des plus grands physiciens de notre siècle, découvrit dans le courant de novembre 1831 ce fait remarquable : au moment où l'on introduit dans un fil métallique un courant électrique, il naît dans un fil voisin, parallèle au premier et séparé de lui par un corps isolant, un courant qui est de sens contraire au premier courant. L'existence du courant ainsi développé par influence ou induction peut être mise en évidence par la déviation spontanée que subit l'aiguille d'un galvanomètre avec lequel communique le fil. Il cesse d'ailleurs aussitôt, bien que le premier courant continue à circuler dans le fil principal; mais si l'on rompt celui-ci, un autre courant instantané se produit en sens inverse dans le fil parallèle et cesse encore immédiatement. On donne au courant primitif le nom de *courant inducteur;* au courant produit quand ce dernier commence, le nom de *courant induit inverse*, et enfin au courant qui se développe, quand on rompt le courant inducteur, le nom de *courant induit direct.*

Les aimants font naître des courants d'induction, tout comme les courants voltaïques; il en est de même, ainsi que l'a prouvé M. Masson en 1834, des décharges d'électricité statique. Nous allons rapidement passer en revue les princi-

pales expériences à l'aide desquelles on constate cette nouvelle série de phénomènes; après quoi, nous décrirons les remarquables appareils dont la construction est basée sur les principes de l'induction, et qui servent aujourd'hui à produire l'électricité avec une puissance extraordinaire.

Pour obtenir des courants induits un peu intenses, il faut donner aux fils parallèles une longueur considérable. On évite l'inconvénient qui en résulte, en enroulant chacun des fils recouverts de soie autour d'un cylindre creux, de carton ou de bois. On a alors ce qu'on nomme une *bobine*. Les deux extrémités du fil viennent aboutir à deux boutons métalliques fixés sur l'une des bases du cylindre, et qui servent à mettre l'hélice en communication, soit avec les deux réophores d'une pile, soit avec un galvanomètre.

Prenons deux bobines, l'une d'un plus grand diamètre que l'autre, de façon que la plus petite puisse pénétrer dans la cavité cylindrique de la plus grande. Celle-ci est en communication avec un galvanomètre, ce sera la *bobine induite;* l'autre, la *bobine inductrice,* une fois introduite dans la première, est mise en communication avec les pôles d'un élément Bunsen. Dès que le courant est fermé, on voit l'aiguille du galvanomètre indiquer par sa déviation, qu'un courant induit inverse a traversé les spires de la première bobine; mais l'aiguille rétrograde aussitôt, revient au zéro après quelques oscillations, et y reste tant que le courant existe. Si alors on rompt le circuit inducteur, l'aiguille dévie en sens inverse, indiquant par conséquent la naissance d'un courant induit direct. Puis elle revient de nouveau au zéro, et y persiste, tant que le courant est rompu.

On peut faire la même expérience d'une autre façon.

Supposons qu'on ait enroulé sur une même bobine deux fils de cuivre, isolés l'un de l'autre par la soie dont ils sont entourés tous deux (fig. 430). L'un communique par ses extrémités avec un galvanomètre G; l'autre à l'élément P d'une pile Bunsen. Le courant qui le parcourt peut être à volonté inter-

rompu ou rétabli en enlevant les portions du fil qui plongent dans les godets g et g' pleins de mercure. Il est donc aisé de constater, en observant le sens de la déviation du galvano-



Fig. 430. — Induction par un courant.

mètre, la naissance des courants induits, direct et inverse, au moment où le courant inducteur finit ou commence.

Que démontre cette première expérience? Que tout courant



Fig. 431. — Induction par l'approche d'un courant.

voltaïque développe, dans un fil conducteur voisin, à l'instant où il commence, un courant inverse; au moment où il finit, un courant direct; enfin que son action inductrice est nulle, pendant tout le temps de la durée du courant inducteur.

Maintenant, supposons la bobine inductrice en relation avec la pile, et le circuit fermé, avant d'approcher les deux bobines

l'une de l'autre, comme le montre la figure 431. Si alors on approche brusquement la bobine inductrice de la bobine induite, un courant inverse naît dans celle-ci, comme l'indique la déviation de l'aiguille du galvanomètre. Aussitôt, ce courant cesse : mais si on éloigne alors la bobine inductrice, un courant induit direct se développe, et cesse immédiatement comme le premier. En un mot, les choses se passent comme dans la première expérience.

Enfin supposons maintenant que, dans l'intervalle qui sépare la production des deux courants induits opposés, on vienne à accroître l'intensité du courant inducteur; à l'instant même où a lieu cet accroissement, l'aiguille du galvanomètre, qui était revenue au zéro, dévie et indique la naissance d'un courant induit inverse. Si l'intensité du courant vient, au contraire, à diminuer, il se produit un courant direct dans la bobine induite.

On peut donc résumer de la façon suivante les phénomènes d'induction par un courant :

Un courant voltaïque développe par influence ou induction, dans un fil conducteur voisin, un courant de sens opposé au sien, c'est-à-dire un *courant induit inverse*, toutes les fois :

1° Qu'il commence ;

2° Qu'il s'approche ;

3° Qu'il augmente d'intensité.

Le même courant produit un *courant induit direct*, ou de même sens que le sien, toutes les fois :

1° Qu'il finit ;

2° Qu'il s'éloigne ;

3° Qu'il diminue d'intensité.

Nous allons voir maintenant les mêmes phénomènes se produire avec les courants magnétiques, c'est-à-dire avec les aimants, et la théorie d'Ampère recevoir ainsi des expériences de l'illustre Faraday une confirmation nouvelle.

Reprenons une bobine dont l'hélice ait ses extrémités en communication avec un galvanomètre. Plaçons un aimant dans

l'axe du cylindre; et approchons vivement l'un de ses pôles de la bobine; l'aiguille du galvanomètre est aussitôt déviée, puis elle retourne à zéro. Le sens de la déviation indique un courant opposé à celui qui, d'après la théorie d'Ampère, représente l'action du pôle voisin de la bobine. D'ailleurs, le courant induit cesse aussitôt, et rien ne se manifeste plus, tant que l'aimant reste en présence (fig. 432). Vient-on à l'enlever subitement, l'aiguille du galvanomètre dévie en sens contraire, puis retourne au zéro après quelques oscillations. Elle a donc accusé la naissance d'un courant induit direct.



Fig. 432. — Induction par un aimant.

Avant d'approcher l'aimant, supposons qu'on ait introduit dans la bobine un cylindre de fer doux (fig. 433). Si maintenant on approche, en le faisant mouvoir selon l'axe du cylindre, un des pôles de l'aimant, il y aura induction et production d'un courant inverse pour une double raison : d'abord la présence de l'aimant suffit à produire le courant induit; de plus, le fer doux est lui-même aimanté par influence et il réagit sur l'hélice de la bobine. Ce qui le prouve, c'est que la déviation de l'aiguille du galvanomètre est plus forte que dans l'expérience précédente. La même remarque s'applique au courant induit direct, que l'éloignement rapide de l'aimant développe dans la bobine. Enfin, si l'on fait varier la distance de l'aimant au fer doux, l'aimantation de ce dernier augmente ou diminue, et l'on constate la naissance de courants induits opposés, dans ces deux circonstances.

En résumé, il y a induction d'un fil conducteur par un aimant et production d'un courant induit inverse, toutes les fois :

1° Que le pôle magnétique s'approche;

2° Qu'il s'établit;

3° Que son intensité augmente.

Il y a, au contraire, production d'un courant induit direct :

1° Si le pôle magnétique s'éloigne;

2° S'il est détruit;

3° Si son intensité diminue.

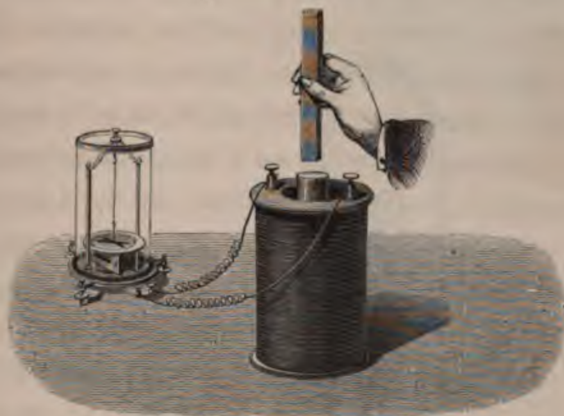


Fig. 433. — Induction par la naissance ou la disparition d'un pôle magnétique.

La puissance magnétique du globe terrestre développe des courants d'induction comme les aimants; enfin, il en est de même, nous l'avons déjà dit, des décharges d'électricité statiques.

§ VI. MACHINES D'INDUCTION.

Les courants d'induction se distinguent des courants ordinaires produits à l'aide de la pile seule, par leur tension, beaucoup plus considérable que celle du courant inducteur. Aussi, les a-t-on utilisés pour construire des appareils électromoteurs d'une grande puissance. Nous nous bornerons à décrire la machine de Clarke et la bobine dont l'invention première est due à M. Masson, mais qui, ayant reçu de M. Ruhmkorff des perfectionnements importants, porte aujourd'hui le nom de ce célèbre constructeur.

La machine de Clarke est représentée dans la figure 434.

Un fort aimant A B, composé de plusieurs plaques en forme de fer à cheval, est solidement fixé à une pièce de bois verticale, de manière à présenter ses deux pôles en face de deux bobines, munies chacune d'un cylindre de fer doux. Les deux noyaux de fer doux sont reliés, du côté de l'aimant, par une plaque de cuivre, et, du côté opposé, par une plaque de fer $t\,t'$.

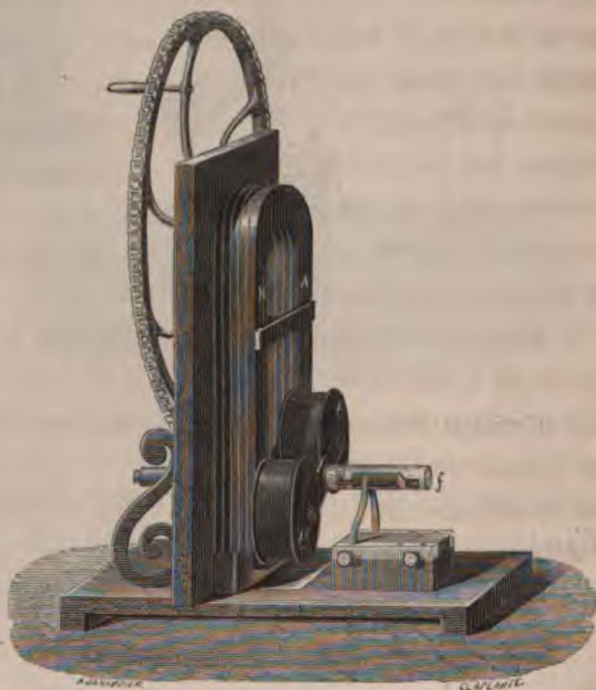


Fig. 434. — Machine magnéto-électrique de Clarke.

Les deux bobines ainsi disposées ne sont autre chose, comme on voit, qu'un électro-aimant : elles peuvent d'ailleurs tourner ensemble autour d'un axe horizontal *f*, qui passe entre les branches de l'aimant, et va s'engrener derrière la planche verticale avec une chaîne sans fin et une roue à manivelle. Quand on met la machine en mouvement, les deux bobines tournent autour de leur axe commun. Chacune d'elles se présente, à chaque révolution, en face de l'un et de l'autre pôle de l'aimant fixe A B; comme les fils, dont leurs hélices sont formés, sont enroulés en sens contraire, l'une d'elles est

sinistrorsum, et l'autre *dextrorsum*. Il résulte de là que les courants induits, développés dans chacune d'elles par l'approche des deux pôles contraires de l'aimant fixe, sont de même sens. Le sens de ces courants change, quand les bobines s'éloignent des deux pôles; mais il change à la fois dans toutes les deux, de sorte qu'à tout instant, les courants induits sont tous deux directs, ou tous deux inverses. L'aimantation des cylindres de fer doux fait naître en outre des courants qui augmentent l'intensité de l'action inductrice. Les deux fils des bobines aboutissent à un appareil spécial qu'on nomme *commutateur*, et qui sert à volonté, soit à conserver au courant le même sens pendant toute la durée du mouvement, soit à laisser le sens de ce courant changer alternativement à chaque demi-révolution.

Avec la machine de Clarke, on produit tous les effets des électromoteurs ordinaires, mais à un degré de tension bien supérieur à celui des piles, par exemple. Des dispositions spéciales permettent de produire, tantôt des commotions violentes, tantôt des étincelles ou des effets calorifiques, tantôt des décompositions chimiques. Dans ce dernier cas, on fait en sorte que le sens du courant reste constant; dans les autres, au contraire, le circuit doit être alternativement fermé et rompu.

La machine d'induction de Ruhmkorff est représentée dans la figure 435. Elle est composée de deux bobines : l'une intérieure, dont l'hélice est formée d'un fil d'assez gros diamètre (2 à 3 millim.), mais de faible longueur, 50 ou 60 mètres par exemple, est la bobine inductrice ; on voit les deux extrémités du fil inducteur aboutir en f et f' à deux petites poupées en laiton. La bobine induite enveloppe la première, qui est logée concentriquement dans sa cavité inférieure; son hélice est formée d'un fil extrêmement fin (un quart de millim.) et d'une longueur qui peut aller jusqu'à 30 kilomètres. Les deux extrémités du fil induit vont extérieurement se rattacher à

deux poupées métalliques A et B, qui surmontent deux colonnes isolantes, en verre. Enfin, à l'intérieur de la bobine inductrice, est placé un faisceau cylindrique de gros fils de fer doux, reliés à leurs extrémités par deux disques de même métal.

Toutes les fois que le courant d'un électromoteur, d'une pile par exemple, sera lancé dans le fil inducteur et le parcourra, entrant en f et sortant en f', un courant induit naîtra dans le fil de la bobine extérieure, sous la double influence de l'hélice inductrice et de l'aimantation du faisceau de fer doux.

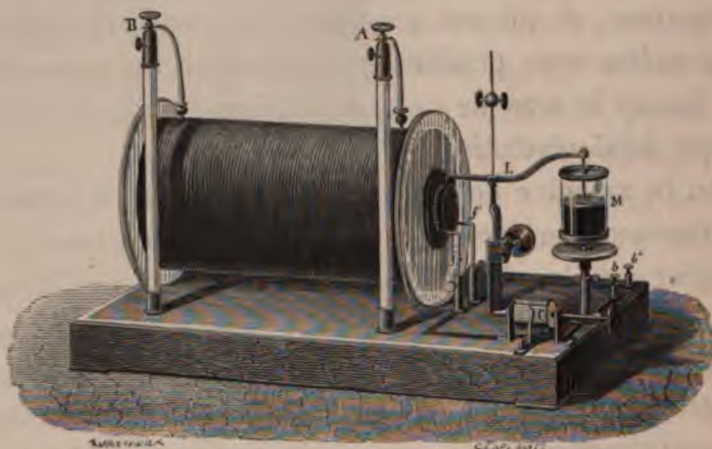


Fig. 435. — Machine d'induction de Ruhmkorff.

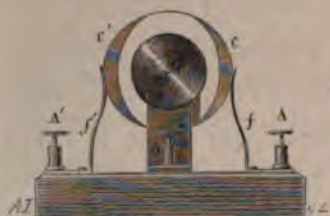
Toutes les fois que le courant inducteur sera interrompu, il naîtra dans l'hélice induite un nouveau courant de sens contraire au premier. En multipliant le nombre des passages du courant et de ses interruptions, on produira une série de courants instantanés, si rapprochés les uns des autres et si intenses que l'effet résultant sera supérieur à celui des plus puissantes batteries. Il nous reste à dire par quel mécanisme on obtient ces interruptions successives.

On voit en L, monté sur une colonne métallique, un levier métallique à deux branches, dont l'une porte une pointe qui affleure à la surface du mercure contenu dans un verre M, tandis que l'autre est terminée par une masse de fer doux,

arrivant à une petite distance du faisceau de fils de fer de la bobine inductrice. Quand la pointe touche la surface du mercure, la masse de fer de l'autre branche n'est plus en contact avec le faisceau; et réciproquement si ce dernier contact a lieu, la pointe ne touche plus le mercure. Partons de la première hypothèse, et voyons ce qui se passe dans l'appareil. Le courant de la pile passe alors dans la colonne qui porte le verre plein de mercure, suit le liquide, la pointe en contact avec lui, la branche L du levier, descend le long de la colonne qui le porte, et par un ruban métallique va rejoindre le fil f' de la bobine inductrice. Le courant passe donc dans l'hélice inductrice, revient par f et retourne à l'autre réophore de la pile. Ainsi le contact de la pointe avec le mercure laisse passer le courant inducteur. Mais, au moment ou ce courant commence, le faisceau de fer doux s'aimante, attire la petite masse du levier, d'où résulte le soulèvement de la branche portant la pointe : celle-ci quitte la surface du mercure et le courant est rompu. Alors l'aimantation du faisceau cesse, le contact de la masse de fer doux n'existe plus; de nouveau la pointe plonge dans le mercure. Les mêmes phénomènes vont donc se produire de la même manière, tant que l'hélice inductrice se trouvera en communication avec la pile. L'interrupteur à mercure que nous venons de décrire a été imaginé par M. Léon Foucault.

Vous n'avons rien dit du commutateur c. On nomme ainsi un appareil qui a pour objet, soit de changer le sens du courant inducteur, soit de l'interrompre. Le commutateur de M. Ruhmkorff (fig. 436) remplit ces deux fonctions à volonté : il est à la fois *rhéotome* (interrupteur du courant) et *rhéotrope* (intervertisseur du courant). C'est un cylindre de buis ou de verre, dont la surface convexe est recouverte en partie de deux lames de cuivre CC', épaisses au milieu et amincies sur les bords. Ces plaques laissent entre elles à découvert deux parties de la surface du cylindre isolant. De chaque côté, deux ressorts f, f' s'appuient latéralement contre le cylindre, quand

il est tourné de manière à présenter aux ressorts l'épaisseur des lames de cuivre. Si, à l'aide d'un bouton dont son axe est muni, on tourne le cylindre de 90 degrés, les lames des ressorts se trouvent en face du verre, qu'elles ne touchent pas d'ailleurs. Dans la première position, le courant passe; dans le second cas, il est interrompu. En effet, le courant arrive de la pile à la poupée A; de là, par le ressort *f*, il passe à la lame de cuivre C. Cette dernière communique par une vis *g* à l'un des tourillons du cylindre, puis au bouton D, et parcourt le circuit dont une des extrémités se trouve fixée en ce dernier point. Il revient par l'autre extrémité au bouton D', au second tourillon du cylindre, et par la vis *g'* à la plaque C' et enfin, par le ressort *f'*, à la poupée A', d'où il retourne à la pile. Que les ressorts *ff'* ne touchent plus les plaques CC', et le courant ne peut plus passer. L'appareil est donc bien interrupteur ou *rhéotrope*.



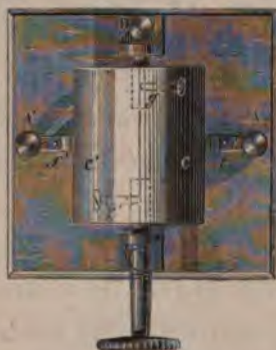


Fig. 436. — Commutateur de la Machine de Ruhmkorff. Plan et élévation.

Mais quand le courant passe comme nous venons de le dire, il suffit de tourner le bouton de 180°, pour en changer le sens. Car alors, c'est la plaque C' qui touche le ressort *f*, et le courant ira de D' en D, au lieu d'aller de D en D'. Ainsi le petit appareil de Ruhmkorff est aussi à volonté *commutateur*, c'est-à-dire *intervertisseur* du courant ou *rhéotrope*. Il fait partie de la bobine d'induction; mais il est clair qu'on peut l'employer toutes les fois qu'on aura besoin de faire, dans un courant, l'une des deux manœuvres pour lesquelles il est construit.

Quand la bobine de Ruhmkorff fonctionne, si l'on rapproche

suffisamment les deux extrémités du fil de l'hélice induite, on voit se succéder une série d'étincelles, avec une rapidité telle que le jet de lumière semble continu. Il est remarquable que, des deux courants induits de sens opposé qui naissent des interruptions successives du courant inducteur, le courant direct produise seul des étincelles : la tension du courant inverse n'est pas assez forte pour qu'il traverse l'air.

Avec les premières bobines, la longueur des étincelles atteignait au maximum 8 millimètres. Peu à peu des perfectionnements parmi lesquels il faut signaler celui de M. Fizeau, qui consiste à interposer un condensateur, une bouteille de Leyde par exemple dans le circuit, ont permis d'obtenir des étincelles beaucoup plus longues, de 10, 20 et 30 centimètres. En donnant à l'hélice induite une longueur de fil de 100000 mètres, M. Ruhmkorff a pu tirer des étincelles de 50 centimètres de longueur : des blocs de verre de 1 décimètre d'épaisseur ont été percés d'outre en outre par la décharge. Les effets physiques qu'on obtient avec cette puissante machine sont extrêmement remarquables : on l'utilise pour charger des bouteilles de Leyde, des batteries électriques. C'est ainsi que M. Jamin, ayant chargé une batterie de 120 bouteilles de Leyde avec quatre bobines accouplées, servies chacune par deux éléments de Bunsen, a pu fondre et volatiliser des fils métalliques de fer, d'argent et de cuivre, de plus d'un mètre de longueur.

CHAPITRE VI.

LA LUMIÈRE ÉLECTRIQUE.

§ I. ÉTINCELLES OBTENUES PAR LES DÉCHARGES D'ÉLECTRICITÉ STATIQUE.

De la faible étincelle qu'on aperçoit dans l'obscurité, quand on approche le doigt du bâton de résine qu'on vient de frotter avec un morceau de laine, aux longs et brillants jets de feu qui s'élancent des conducteurs des puissantes batteries, ou à l'éblouissante lumière de l'arc voltaïque, il y a loin sans doute. C'est cependant toujours le même phénomène ; c'est lui qui apparaît encore avec plus de beauté et de grandeur dans les nuées orageuses. Quelles sont les circonstances dans lesquelles il se produit? Nous l'avons vu : c'est toutes les fois que deux corps chargés d'électricités opposées, à une tension suffisamment grande, se trouvent en présence, et qu'un intervalle non conducteur, un milieu résistant est interposé entre les deux corps. La tendance qu'ont les électricités contraires à se réunir pour se combiner et reconstruire de l'électricité neutre, se trouvant contrariée par la résistance du milieu non conducteur, il y a transformation de forces vives, transformation de l'électricité en chaleur et en lumière. De là l'étincelle sous toutes ses apparences.

Ce sont ces apparences variées que nous allons maintenant passer en revue, soit dans les décharges d'électricité statique ou à haute tension, soit dans les courants d'électricité dynamique, que les piles ou les appareils d'induction ont permis de développer à un si haut degré de puissance.

Avec les machines électriques ordinaires de grandes dimensions, on peut produire des effets de lumière remarquables. Pour cela, on se sert d'un plateau métallique, qu'on tient à la main par un manche isolant, et qu'on réunit par une chaîne métallique aux coussins frotteurs.

En approchant le bord du plateau du conducteur de la machine, à des distances diverses, on voit jaillir d'abord l'étincelle sous la forme d'un trait de feu rectiligne d'une blancheur et d'un éclat éblouissants. Si on alimente la tension du conducteur, en tournant la manivelle sans interruption, les étincelles



Fig. 437. — Étincelles obtenues par une décharge d'électricité statique.

se succèdent avec tant de rapidité, que le trait de feu paraît continu. Les étincelles s'amincissent par leur milieu, à mesure que la distance des deux corps conducteurs augmente, et la rapidité de leur succession diminue. Alors leur forme rectiligne fait place à des traits plus ou moins contournés en zigzags, ou en forme de serpentins, comme si, dans le trajet, la résistance que le flux d'électricité éprouve dans son passage était inégalement distribuée.

Outre le principal trait de lumière, on aperçoit, quand la distance devient plus grande encore, des ramifications lumineuses qui partent de tous les côtés, et donnent à l'étincelle les formes représentées dans les dessins de la figure 438. Ces longues étincelles ramifiées sont évidement la forme de

transition entre l'étincelle rectiligne et l'aigrette lumineuse. Pour obtenir cette dernière forme de la lumière électrique, émanée des conducteurs des machines ordinaires, il faut présenter le plateau métallique à une distance plus grande que celle où ont lieu les explosions que nous venons de décrire.

On voit alors s'échapper du conducteur une espèce d'arbre lumineux qui tient à la machine par son tronc, et dont les branches en nombre infini divergent vers le plateau. La figure 439 reproduit une aigrette lumineuse, telle qu'elle a été obtenue par Van Marum. Entre le plateau et l'aigrette, tantôt il existe un espace obscur; tantôt une masse de lumière beaucoup plus resserrée, et ayant sa base sur le bord du plateau, va rejoindre le sommet de l'aigrette. Nous supposons ici que le conducteur est chargé d'électricité positive, et alors le plateau électrisé par influence est chargé lui-même d'électricité négative. Si l'inverse avait lieu, l'aigrette à larges ramifications s'échapperait du plateau, et l'aigrette étroite, du conducteur. Faraday, qui a étudié les formes des aigrettes positives et négatives, a montré que cette différence tient à l'inégale tension des deux électricités, quand a lieu la décharge. L'électricité négative exige, pour sa décharge, une tension beaucoup moins grande que l'électricité positive.

La lumière électrique peut se produire dans différents milieux, dans l'air et les autres gaz, et même dans les liquides mauvais conducteurs : son apparence, c'est-à-dire sa forme et sa couleur changent, suivant ces milieux, et quand la décharge a lieu dans un gaz, elles varient avec la pression ou le degré de raréfaction de ce dernier.

Dans l'air à la pression ordinaire, nous avons vu que l'étincelle est d'un blanc éclatant. D'après Van Marum qui a fait sur ce sujet de nombreuses expériences, sa couleur est bleuâtre. teintée de pourpre, dans l'azote; très-blanche dans l'oxygène; rouge-violacée dans l'hydrogène; verdâtre dans l'acide carbonique; vert-rougeâtre dans le gaz hydrogène carboné, et blanche dans l'acide chlorhydrique.

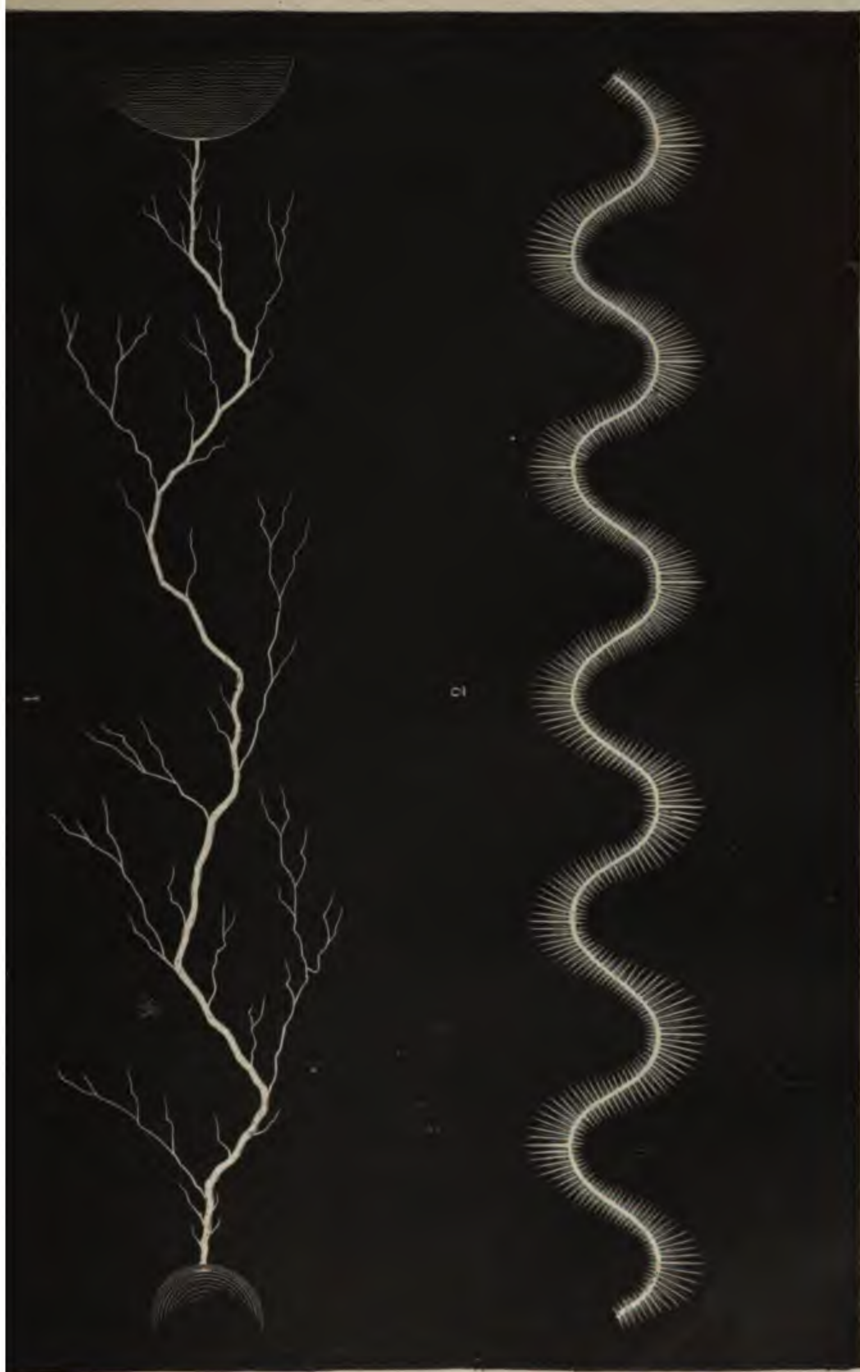


Fig. 438. — Étincelles ramifiée et sinueuse, d'après Van Marum.

Le tronc des aigrettes lumineuses positives est dans l'air, à la pression ordinaire, d'une couleur violette, teintée de pourpre, tandis que les ramifications sont blanches, ce qui tient peut-être à ce que la lumière s'y trouve moins condensée. Dans les

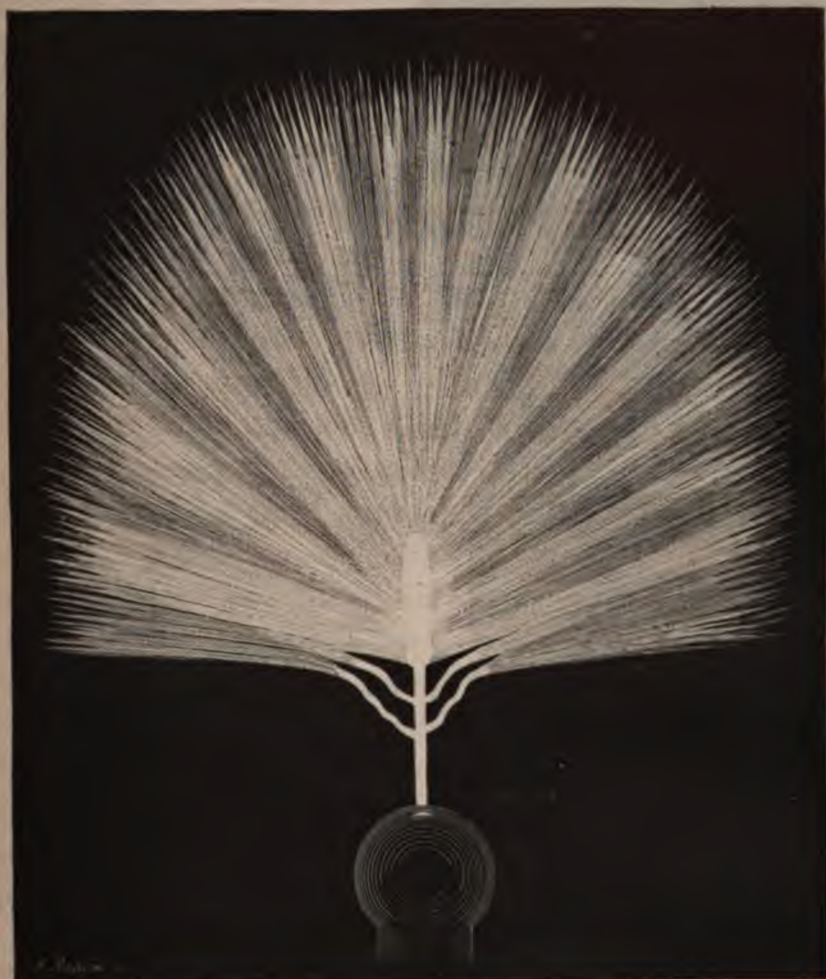


Fig. 439. — Aigrette électrique, d'après Van Marum.

autres gaz, la couleur des aigrettes varie, comme les expériences de Faraday l'ont fait voir : ainsi, dans l'hydrogène, dans le gaz d'éclairage, elle est légèrement verdâtre; dans l'oxygène, elle est blanche comme dans l'air, mais beaucoup moins belle; dans l'azote raréfié, elle est au contraire magni-

fique; dans l'oxyde de carbone, l'acide carbonique, elle est courte, verdâtre dans le premier gaz, et légèrement pourpre dans le second. Dans le vide barométrique, il n'y a plus d'étincelle, ou plutôt, l'étincelle jaillit entre le conducteur et le fil métallique qui plonge dans le mercure : à ce moment, le vide barométrique est illuminé d'une lueur verdâtre, comme le montre la figure 441.



Fig. 440. — Aigrettes positive et négative.

Pour étudier les effets lumineux que produit la décharge électrique dans les milieux gazeux raréfiés, on se sert de l'appareil représenté dans la figure 442, qu'on nomme l'*œuf électrique*. Deux tiges métalliques terminées chacune par une boule et communiquant avec les garnitures également conductrices de l'appareil, peuvent être approchées ou éloignées à volonté. L'œuf peut se détacher de son pied et se visser sur la machine pneumatique, de sorte qu'on y peut raréfier l'air à volonté, faire le vide, introduire un gaz à une pression quelconque.



Fig. 441. — Lueur dans le vide barométrique.

Dans l'air à la pression ordinaire, l'étincelle part entre les deux boules, toute semblable à celle que nous avons décrite en commençant. Mais à mesure qu'on raréfie l'air, la lumière change d'apparence : elle s'échappe en gerbe ramifiée de la boule positive; à la pression de 60^{mm} elle offre l'aspect de la figure 443. On voit qu'alors

elle se compose d'un certain nombre de bandes lumineuses de couleur pourpre, les unes divergeant latéralement, les autres venant aboutir à la boule négative qui est elle-même enve-



Fig. 442. — Œuf électrique



Fig. 443. — Lumière électrique dans l'air raréfié. Bandes pourprées.

loppée d'une épaisse couche de lumière violacée. Quand la pression est réduite à quelques millimètres, les bandes se réunissent en une gerbe lumineuse, en forme de fuseau.

§ II. ARC VOLTAÏQUE.

Tous les phénomènes lumineux que nous venons de décrire sont ceux que produisent les décharges d'électricité statique. Entre les deux bouts, rapprochés à une certaine distance, des réophores d'une pile d'un assez grand nombre d'éléments, on obtient aussi des étincelles très-brillantes qui se succèdent avec

rapidité. Nous avons dit que le phénomène est beaucoup plus beau, la lumière beaucoup plus intense, quand on la fait jaillir entre les deux pointes de deux cônes de charbon dont les extrémités des réophores sont munies. On obtient alors ce qu'on nomme l'*arc voltaïque.* En employant les courants d'induction, on peut produire des effets lumineux extrêmement remarquables, sans avoir besoin d'une pile d'un grand nombre d'éléments. Entrons dans quelques détails sur l'arc voltaïque.

Nous avons déjà dit qu'il faut, pour que l'arc lumineux se produise, placer les pointes de charbon très-rapprochées l'une de l'autre; mais, une fois que le courant a vaincu la résistance de l'air interposé et produit la lumière, on peut écarter les cônes; Davy, en opérant dans l'air raréfié, a obtenu, avec sa puissante pile de 2000 couples, un jet de lumière de dix-huit centimètres de longueur. L'intensité lumineuse de l'arc voltaïque est si considérable, que l'œil en peut à peine supporter l'éclat. D'après des expériences comparatives dues à MM. Fizeau et Foucault, cette intensité est près de cinquante fois celle de la lumière Drummond, c'est-à-dire de la lumière déjà si vive, qu'on obtient en dirigeant sur un fragment de chaux un jet enflammé de gaz oxy-hydrogène; la lumière solaire n'a guère qu'une intensité triple de celle de l'arc voltaïque. Ces deux savants opéraient avec une pile de Bunsen de 92 couples, disposées en deux séries.

En étudiant le phénomène si intéressant de l'arc voltaïque, on a reconnu que le courant d'électricité qui passe d'une manière continue entre les deux cônes, entraîne de l'un à l'autre des particules de charbon très-ténues : ce transport de matière se fait avec plus d'abondance du pôle positif au pôle négatif, de sorte que les charbons s'usent inégalement : le charbon négatif grossit donc aux dépens de l'autre. La figure 444 montre l'apparence des deux cônes vus par projection et agrandis. Laissons décrire le phénomène par le savant physicien à qui nous devons la communication de ce dessin. Voici comment s'exprime M. Le Roux, dans une

conférence sur l'application de l'électricité à l'éclairage des phares, faite par lui à la *Société d'Encouragement pour l'industrie nationale :*

« Pour examiner directement ce qui se passe dans l'arc voltaïque, il faudrait de grandes précautions afin de mettre



Fig. 444. — Arc voltaïque. Cônes de charbon.

l'organe de la vue en garde contre l'intensité considérable de la lumière; mais cette même intensité va nous permettre de faire jouir toute l'assemblée des plus petits détails de la surface des charbons. Il suffit d'interposer entre eux et cet écran une lentille d'un foyer convenable : vous apercevez l'image des charbons agrandie une centaine de fois; cette pro-

jection vous permet de juger, sans fatigue, de l'ensemble du phénomène. Voici des charbons entre lesquels passe le courant continu d'une pile de Bunsen : vous voyez l'un des charbons changer de forme plus vite que l'autre; celui qui s'use le plus est le charbon positif, c'est lui qui communique avec le côté charbon de la pile; s'il est moins pointu que l'autre, c'est bien qu'il perd de la matière tandis que l'autre en gagne; nous pouvons, en effet, intervertir le sens du courant, vous voyez le charbon qui tout à l'heure était le moins pointu s'effiler, tandis que l'autre s'épointe; d'ailleurs de temps en temps quelques parcelles plus grosses se détachent, traversent l'espace sous forme de petites masses incandescentes et indiquent bien le sens du transport. Vous voyez de petits globules bouillonner çà et là à la surface des charbons, ce sont des globules de silice fondue ; vous remarquerez que ces globules n'apparaissent pas aux points où la température est la plus élevée, ils sont volatilisés avant que l'usure des charbons les ait atteints. Nous voici dans une veine très-impure, une quantité trop considérable de ces globules de silice se montre; l'éclat de l'arc faiblit; si l'on souffle légèrement en travers des charbons, le courant d'air incline la flamme et nous en montre le développement. Nous atteignons maintenant une partie où la pureté paraît ne rien laisser à désirer. Vous voyez comme l'arc est tranquille, la marche régulière, les surfaces nettement terminées. Vous apercevez la douce lumière bleuâtre de l'arc contrastant avec le blanc éclatant de certaines parties des charbons ; l'arc proprement dit forme une sorte de cône tronqué renflé dans sa partie moyenne, dont les deux bases sont sur les charbons; ces deux bases sont les parties les plus éclairantes, c'est sur elles que la température est la plus élevée, c'est là que viennent frapper les molécules transportées par le courant. »

Quand on fait traverser aux courants d'induction un espace rempli de vapeurs ou de gaz très-raréfiés, les effets lumineux offrent des caractères particuliers d'un haut intérêt.

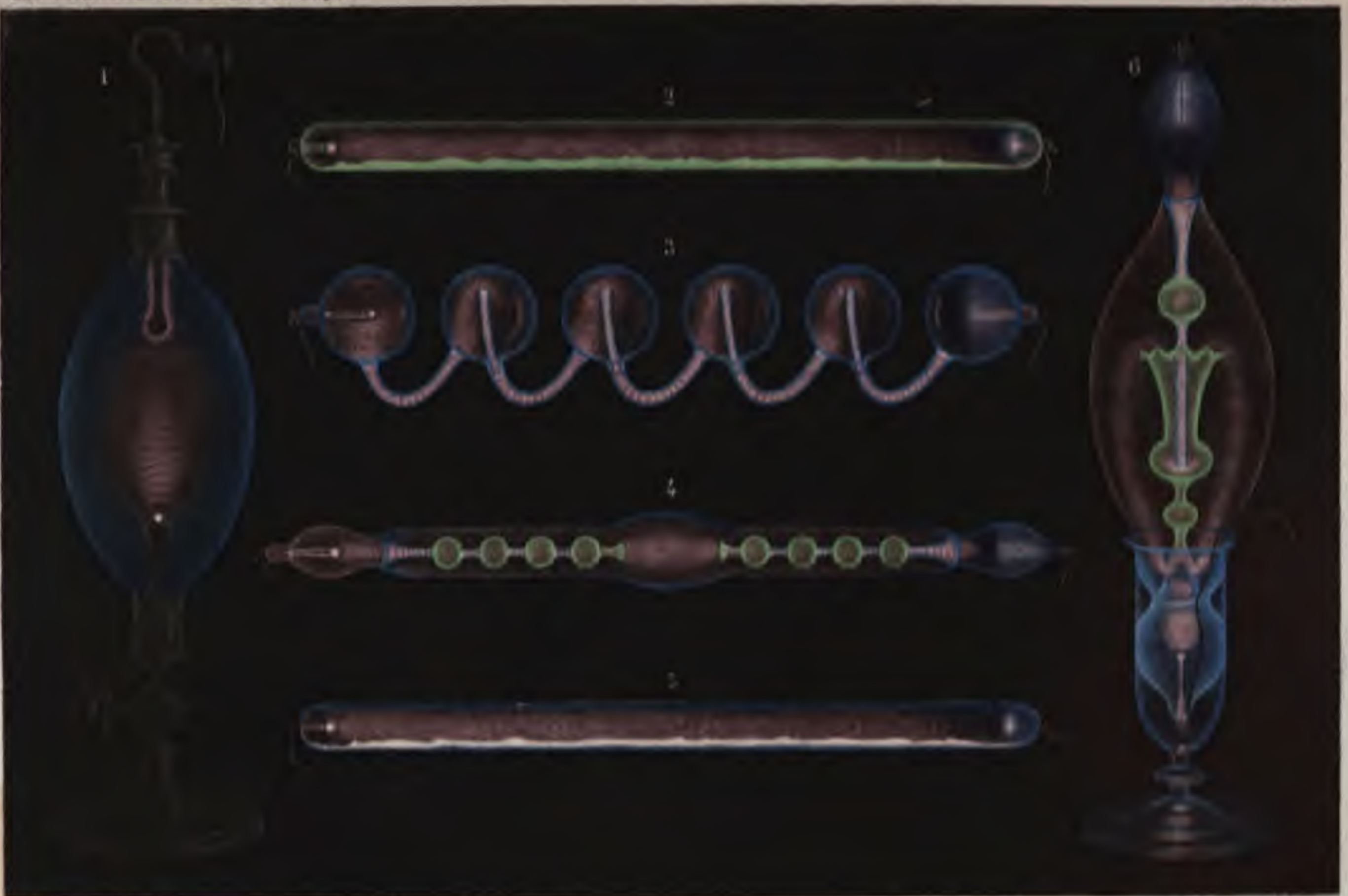


LA LUMIÈRE ÉLECTRIQUE

DANS LES GAZ RARÉFIÉS

[illegible] permet de juger, sans fatigue, de l'ensemble du phénomène. Voici des charbons entre lesquels passe le courant [illegible] : vous voyez l'un des charbons [illegible] que l'autre; celui qui s'use le plus [illegible] qui communique avec le côté [illegible] est moins pointu que l'autre; c'est bien [illegible] tandis que l'autre en gagne; nous pouvons, en effet, renverser le sens du courant, vous voyez le charbon qui tout à l'heure était le moins pointu s'effiler, tandis que l'autre s'épointe; d'ailleurs de temps en temps quelques parcelles plus grosses se détachent, traversent l'espace sous forme de petites masses incandescentes et indiquent bien le sens du transport. Vous voyez de petits globules bouillonner çà et là à la surface des charbons, ce sont des globules de silice fondue; vous remarquerez que ces globules [illegible] points où la température est la plus [illegible] l'usure des charbons les [illegible] une très-impure, une quantité trop considérable de ces globules de silice se montre; l'éclat de l'arc faiblit; si l'on souffle légèrement en travers des charbons, le courant d'air incline la flamme et nous en montre le développement. Nous atteignons maintenant une partie [illegible] laisser à désirer. Vous voyez comme [illegible] marche régulière, les surfaces nettement [illegible]. Vous apercevez la douce lumière bleuâtre de l'arc contrastant avec le blanc éclatant de certaines parties des charbons. [illegible] proprement dit forme une sorte de cône [illegible] dans sa partie moyenne, dont les deux bases [illegible] charbons; ces deux bases sont les parties les [illegible] elles que la température est la plus [illegible] viennent frapper les molécules transportées [illegible].

Quand on [illegible] aux courants d'induction un espace rempli de [illegible] très-raréfiés, les effets lumineux offrent des caractères particuliers d'un haut intérêt.



M. Rapine del et sc.

LA LUMIÈRE ÉLECTRIQUE

DANS LES GAZ RARÉFIÉS

Si l'on raréfie l'air contenu dans l'œuf électrique, à une pression de deux ou trois millimètres, et si l'on met les boules intérieures en communication avec les pôles d'une bobine de Ruhmkorff, on voit aussitôt une magnifique gerbe lumineuse, d'un beau rouge, jaillir de la boule positive, tandis que la boule et la tige négatives sont enveloppées d'une couche de lumière, d'un pourpre bleuâtre. Qu'on renverse le sens du courant à



Fig. 445. — Gerbe lumineuse dans l'air raréfié. Décharge des courants d'induction.



Fig. 446. — Lumière stratifiée dans un gaz raréfié.

l'aide du commutateur, aussitôt on voit les deux lumières s'intervertir; la gerbe part alors de la boule inférieure, tandis que l'auréole violette enveloppe la boule supérieure.

Si, avant de raréfier l'air, on a introduit des vapeurs de plusieurs substances, par exemple d'alcool, de phosphore, d'essence de térébenthine, la gerbe lumineuse prend un aspect particulier qui a été découvert presque en même temps par MM. Ruhmkorff, Grove et Quet. La lumière rouge de la

gerbe se trouve interrompue transversalement par des bandes obscures, très-serrées, de sorte qu'elle est alternativement formée par des strates obscures, et par des strates brillantes. A partir du milieu de la gerbe, où les strates sont rectilignes, elles se courbent en deux sens opposés, de manière à regarder chacune des boules par leur concavité. C'est à ce phénomène qu'on donne le nom de *stratification de la lumière électrique.*

On a depuis donné diverses formes aux vases qui contiennent les vapeurs raréfiées, propres à la production de la lumière électrique stratifiée. La planche X, dont les divers dessins ont été dessinés d'après nature, reproduit quelques-unes des expériences les plus curieuses de ce genre, faites dans les tubes connus sous le nom de *tubes de Geissler.* La beauté de ces effets lumineux est encore rehaussée par les phénomènes de phosphorescence que la lumière électrique produit dans le verre d'urane, dans le strontium et le calcium, ou enfin dans le sulfate de quinine.

LIVRE SIXIÈME.

LES MÉTÉORES ATMOSPHÉRIQUES.

---

§ I. MÉTÉORES OPTIQUES. — L'ARC-EN-CIEL, LE MIRAGE

Tous les phénomènes que nous avons décrits jusqu'ici, et dont la science nous a progressivement fait connaître les lois, se manifestent sous les yeux de tout le monde, dans la libre nature, sur une échelle bien autrement grandiose que dans le cabinet du physicien. Seulement, au lieu de se trouver isolés, analysés, rangés par catégories, comme la science l'exige, — sans cette séparation ou abstraction, la science ne serait pas possible, — les phénomènes de pesanteur, de lumière, de chaleur, de son, d'électricité coexistent, réagissent les uns sur les autres, luttent, concourent, se modifient de mille manières différentes : de ces innombrables actions résultent les contrastes et les harmonies que le monde physique présente à l'artiste comme au savant.

Envisagés dans leur ensemble, étudiés dans leur production, leur succession et leur périodicité naturelle, les phénomènes physiques prennent le nom de *météores*, et constituent une science spéciale, la *météorologie*. C'est une science qui se rattache, comme on voit, à la physique, sans laquelle elle ne pourrait expliquer les faits particuliers dont il s'agit. C'est,

à proprement parler, une application de la physique, mais une application qui échappe, en grande partie du moins, à l'action individuelle de l'homme. Notre intention, dans ce Sixième Livre, n'est pas d'en donner même une esquisse; nous voulons seulement montrer comment les météores dont les effets nous sont le plus familiers se lient aux phénomènes de chaleur, d'électricité, de lumière, de pesanteur que nous avons étudiés dans les cinq premiers Livres de cet ouvrage, et faire voir qu'ils sont soumis aux mêmes lois.

Nous considérons seulement les *météores* qu'on peut appeler *atmosphériques*, le lieu de leur production étant l'enveloppe aérienne dont le globe terrestre est entouré : ils peuvent se ranger en trois classes principales, les *météores lumineux* ou *optiques;* les *météores aqueux*, dont la production est due aux modifications subies par l'eau atmosphérique, sous l'influence des variations de la pression et de la température; enfin, les *météores électriques* et *magnétiques*.

Le mirage, l'arc-en-ciel sont ceux que nous décrirons parmi les météores optiques; les nuages et les brouillards, la rosée, la pluie, la neige, parmi les météores aqueux; enfin, la foudre, le tonnerre et les éclairs, puis les aurores polaires, boréales ou australes, parmi les météores dont la production est due à l'électricité de l'atmosphère.

La réfraction des rayons lumineux qui ont à traverser, soit les couches entières de l'atmosphère, soit quelques-unes d'entre elles, donne lieu à plusieurs phénomènes, parmi lesquels nous avons décrit déjà l'élévation apparente des objets au-dessus de leur position réelle, ce qu'on nomme la réfraction atmosphérique. Le *mirage* est un phénomène dû à la même cause. On l'observe principalement à la surface des plaines de sable, quand le sol est fortement échauffé par les rayons du soleil. Le voyageur qui parcourt ces plaines voit alors les objets qui s'élèvent au-dessus du sol, réfléchis comme sur une nappe liquide. L'illusion est si forte que ceux qui sont,



Fig. 447. — Le mirage dans les déserts de l'Afrique.

pour la première fois, témoins du phénomène, ne peuvent s'empêcher de croire à l'existence réelle d'un lac étendant ses eaux à l'horizon. Les soldats français de l'expédition d'Égypte se sont plus d'une fois laissé prendre à cette apparence trompeuse. Accablés de fatigue et de soif, ils voyaient les bords du lac tant désiré fuir à mesure qu'ils approchaient, renouvelant pour eux, sous une forme non moins décevante, le supplice de Tantale. Monge, un des savants qui composaient l'Institut d'Égypte, donna le premier une explication complète du mirage, que d'ailleurs on n'observe pas seulement dans les déserts d'Afrique.

Voici quelle est, d'après lui, la théorie du phénomène.

Les rayons solaires en arrivant à la surface de la couche sablonneuse, l'échauffent très-fortement, tandis qu'ils ont traversé les couches d'air superposées sans élever notablement leur température, le pouvoir absorbant des gaz étant très-faible relativement à celui des corps solides. Mais la chaleur du sol se communique par le contact à la couche d'air la plus basse et de celle-ci successivement à celles qui la surmontent. L'air dilaté tend bien à s'élever en vertu de sa légèreté spécifique ; mais si le sol présente une surface de niveau à peu près horizontale, et si l'atmosphère est calme, l'équilibre subsiste, et il ne se forme que de faibles courants, produits par quelques inégalités dans la dilatation des diverses portions de la couche d'air inférieure. Il résulte de là que, vers le milieu du jour, les couches d'air voisines du sol sont rangées, de haut en bas, par ordre de densités décroissantes. Considérons alors un faisceau lumineux envoyé obliquement vers le sol par le point M d'un objet éloigné (fig. 448). En passant d'un milieu plus dense dans une couche raréfiée, il déviera en s'éloignant de la verticale, de *a* en *d*, et cette déviation ira en croissant à mesure qu'il rencontrera des couches de moins en moins réfringentes, jusqu'à ce que, tombant en A sur une couche avec la surface de laquelle il fait un angle égal à l'angle limite, il éprouvera la réflexion totale. A partir de ce point, il suivra

une marche inverse, se rapprochant de plus en plus de la verticale et tombant en O dans l'œil de l'observateur, qui voit alors une image du point M en M′, point de convergence des rayons formant le faisceau. La même marche s'appliquant à tous les points de l'objet — ici, c'est un arbre — celui-ci semblera réfléchi comme dans un miroir, et l'observateur en verra une image renversée. Le ciel se réfléchit de la même façon, d'où l'apparence brillante du sol à une certaine distance de l'objet,

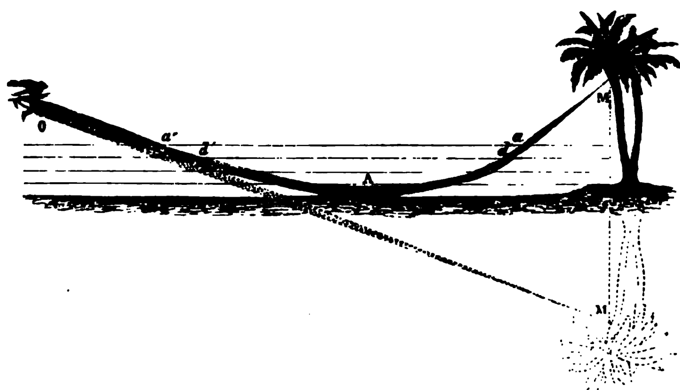


Fig. 448. — Explication du mirage.

apparence qui fait croire à la présence d'une nappe liquide baignant le pied de celui-ci.

Le phénomène du mirage a lieu aussi à la surface de la mer, quand l'eau possède une température plus élevée que celle de l'air, et l'explication est la même que celle du mirage au-dessus du sol. Quand les couches d'air inégalement échauffées, au lieu d'être séparées par des surfaces horizontales, le sont plus ou moins obliquement, on a le mirage *latéral*, qui s'observe principalement dans les pays de montagnes, ou encore dans le voisinage des édifices : dans ce dernier cas, les objets paraissent réfléchis comme dans un miroir vertical. Il peut même arriver, ce qu'on observe quelquefois sur mer, que l'image de l'objet, d'un navire par exemple, se forme au-dessus de lui. Le fils du célèbre navigateur et physicien Scoresby a été témoin, dans les mers polaires, de ce dernier phé-

nomène, auquel on donne alors le nom de mirage *inverse*. Il aperçut un jour dans les airs l'image renversée d'un navire que montait son père, et dont une bourrasque l'avait séparé, et cette image avait assez de netteté pour qu'il pût reconnaître le navire, bien qu'il fût alors entièrement caché sous l'horizon. Pour expliquer ce phénomène il faut supposer l'existence, à une certaine hauteur dans l'atmosphère, de couches d'air horizontales dont la densité diminue rapidement de bas en haut.

Le mirage est un phénomène de réfraction simple. L'*arc-en-ciel*, les *halos*, les *parhélies* sont des météores lumineux produits par la dispersion de la lumière dans son passage à travers les gouttes de pluie, les gouttelettes très-fines dont sont formés les nuages ou les aiguilles de glace qui flottent dans l'athmosphère. Nous nous bornerons ici à donner la théorie de l'arc-en-ciel, entrevue par Antonio de Dominis dès 1611, formulée d'une manière plus précise par Descartes, et enfin complétement élaborée par Newton.

Tout le monde sait que l'arc-en-ciel ou iris se montre à l'opposé du soleil, au travers des nuages qui se résolvent en pluie, et qu'il est tantôt simple, tantôt accompagné d'un arc extérieur ordinairement moins brillant que le premier. L'*arc pincipal* ou *intérieur* forme une bande circulaire, dans la largeur de laquelle on aperçoit toutes les couleurs du spectre, rangées du violet au rouge, en allant de l'intérieur à l'extérieur. L'arc secondaire, plus large que le premier, offre les mêmes couleurs disposées dans un ordre contraire, de sorte que le rouge est en dedans, vis-à-vis le rouge de l'arc principal. La planche XI montre quelle est cette disposition, et donne une idée exacte de la largeur et de l'état relatif des arcs, ainsi que des dimensions apparentes de la zone qui les sépare.

Pour se rendre compte des conditions qui président à la production du phénomène, nous allons voir quelle est la

marche suivie par un rayon solaire, quand il tombe sur la surface d'une goutte sphérique de pluie.

En arrivant à la surface de la sphère, le rayon lumineux se réfracte, se rapproche de la normale au point d'incidence, ou



Fig. 449. — Marches des rayons efficaces dans une goutte de pluie, après une seule réflexion intérieure.

du rayon, et suit une corde du grand cercle dans le plan duquel nous le supposons dirigé. En rencontrant la surface intérieure de la sphère liquide, il se partage, émerge en partie, et se réfléchit pour l'autre partie. La même chose arrive à chacune des rencontres du rayon réfléchi, dont l'intensité va en diminuant, au fur et à mesure que s'accomplissent ces réflexions successives. Connaissant l'angle d'incidence du rayon lumineux, on peut calculer l'angle d'émergence du rayon qui

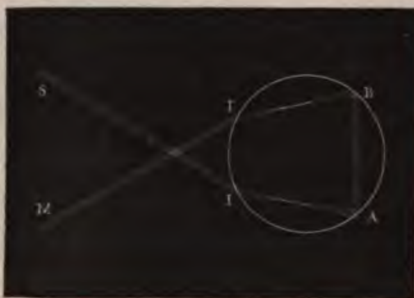


Fig. 450. — Marche des rayons efficaces après deux réflexions intérieures.



marche suivie par un rayon solaire, quand il tombe sur la surface d'une goutte sphérique de pluie.

En arrivant à la surface de la sphère, le rayon lumineux se réfracte, se rapproche de la normale au point d'incidence, ou



Fig. [illegible]. — Marche des rayons efficaces dans une goutte de pluie, après une seule réflexion intérieure.

du rayon, et suit une corde du grand cercle dans le plan duquel nous le supposons dirigé. En rencontrant la surface intérieure de la sphère liquide, il se partage, émerge en partie, et se réfléchit pour l'autre partie. La même chose arrive à cha-



Fig. [illegible]. — Marche des rayons efficaces après deux réflexions intérieures.

cune des rencontres du rayon réfléchi, dont l'intensité va en diminuant, au fur et à mesure que s'accomplissent ces réflexions successives. Connaissant l'angle d'incidence du rayon lumineux, on peut calculer l'angle d'émergence du rayon qui



E. Roujat pinx^t Digeon sculp^t

ARC EN CIEL DOUBLE

sort de la sphère liquide, après une, deux ou un nombre quelconque de réflexions intérieures.

Au lieu d'un seul rayon de lumière, si l'on considère un faisceau tel que S I, les angles d'incidence des rayons qui composent le faisceau n'étant pas les mêmes pour tous, les rayons émergents sortiront en général en divergeant de la sphère, de sorte que, dispersés dans l'espace, ils ne pourront agir sur l'œil, ni produire une image sur la rétine à une distance un peu considérable. Cependant, le calcul prouve que pour certaines incidences, les rayons émergents forment un faisceau cylindrique dont l'intensité restera sensiblement la même à une distance un peu considérable. Newton a donné le nom de *rayons efficaces* à ceux qui jouissent de cette propriété.

Maintenant rappelons-nous que les divers rayons colorés dont se compose un faisceau de lumière blanche, ou de lumière solaire, n'ont pas la même réfrangibilité. Les incidences qui correspondent aux rayons efficaces de chaque couleur simple ne sont donc pas les mêmes; il résulte de là qu'en sortant de la sphère liquide, le faisceau incident se trouvera divisé en autant de faisceaux séparés qu'il y a de couleurs dans le spectre. En calculant les angles d'incidence pour les rayons efficaces des couleurs simples extrêmes, le violet et le rouge, après une seule réflexion intérieure, on trouve:

Pour les rayons violets, un angle d'incidence de 58° 40′;

Pour les rayons rouges, un angle d'incidence de 59° 23′. Et alors, les angles que les rayons émergents font avec la direction des rayons incidents sont de 40° 17′ pour les rayons violets, de 42° 2′ pour les rayons rouges.

Dans le cas de deux réflexions intérieures, en A et B, les angles d'incidences des rayons efficaces sont:

Pour le violet, 71° 26′; pour le rouge, 71° 50′; et les déviations subies par les rayons, après leur émergence de la sphère liquide, sont de 50° 59′ pour les rayons rouges, et de 54° 9′ pour les rayons violets.

On peut, à l'aide de ces données, faire voir que l'arc-en-

ciel principal est produit par les rayons solaires, qui ont subi une seule réflexion à l'intérieur des sphères liquides composant les gouttes de pluie. L'arc-en-ciel extérieur est produit par les rayons qui ont éprouvé deux réflexions successives. Soit OZ une ligne parallèle à la direction des rayons solaires, et passant par l'œil de l'observateur qui lui-même tourne le dos au Soleil. En regardant dans la direction O*a*, telle que l'angle *a*Oz soit celui de la déviation correspondant aux rayons violets efficaces, l'observateur recevra dans l'œil un rayon violet provenant du rayon solaire S*a* qui s'est réfléchi une fois dans les gouttes de pluie quand elles passent successivement dans leur chute par le point *a*. En effet, le parallélisme des lignes OZ et S*a* conduit à l'égalité des angles S*a*O et *a*OZ ; or ce dernier est par hypothèse égal à l'angle de déviation qui correspond aux rayons efficaces violets. Le rayon S*a* trouvera donc une goutte de pluie, dont la position sera celle qui convient à l'incidence et à l'émergence calculées : l'œil verra un point violet. Environ 2 degrés plus haut, en *b*, il verra un point rouge, et dans l'intervalle *ab* toutes les nuances du spectre comprises entre le rouge et le violet, c'est-à-dire l'orangé, le jaune, le vert, le bleu, l'indigo. Mais évidemment, la même chose aura lieu pour toute direction faisant avec OZ les mêmes angles que celles dont il vient d'être question. L'observateur verra donc des bandes de toutes ces couleurs, se projetant sur le ciel sous forme de cercles concentriques ayant leur centre sur la ligne OZ, en un point diamétralement opposé au Soleil. Voilà pour les rayons solaires qui pénètrent dans les gouttes de pluie et en sortent après une réflexion unique. Ceux qui ont subi deux réflexions, tels que S*a'*, *a'*O, ou S*b'*, *b'*O, arriveront dans l'œil en formant avec la ligne OZ des angles de 50°59', si ce sont des rayons rouges, de 54°9', si ce sont des rayons violets. Les rayons efficaces des couleurs intermédiaires seront compris entre ces rayons extrêmes. Mais on voit qu'ici, c'est le rouge qui est à l'intérieur, et le violet à l'extérieur.

Tous ces résultats se déduisent du calcul, d'après les lois de

la réflexion et de la réfraction de la lumière, et étant donné l'indice de réfraction de l'eau. Or, les dimensions angulaires de chaque arc-en-ciel, la largeur des zones, celle de l'intervalle qui les sépare, sont autant de conséquences des données qui précèdent, et si la théorie est exacte, l'observation doit permettre d'en vérifier la justesse. C'est en effet ce que Newton et tous les observateurs qui ont, après lui, étudié l'arc-en-ciel ont constaté. Quand le Soleil est à l'horizon, la ligne OZ est dans ce plan.

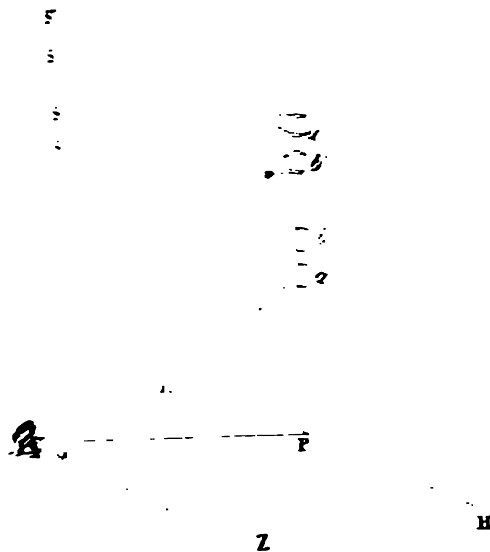


Fig. 451. — Théorie de l'arc-en-ciel; formation de l'arc principal et de l'arc secondaire.

Le centre des arcs est donc lui-même à l'horizon, et l'arc-en-ciel se montre sous la forme d'un demi-cercle; c'est la forme qu'il présente en effet, soit au lever, soit au coucher du Soleil à l'observateur situé en plaine. Pour des hauteurs différentes de l'astre, l'arc-en-ciel a une amplitude moindre qu'une demi-circonférence, et d'autant moindre qu'il est plus élevé. Enfin, si l'observateur était situé sur une montagne très-haute, et sur un pic étroit, il pourrait voir plus d'une demi-circonférence, et même un cercle complet, si la pluie tombe à une distance peu considérable.

Il ne faut pas oublier que l'arc-en-ciel est un phénomène

dont la production dépend uniquement de la position de l'observateur relativement au Soleil et à la nuée qui se résout en pluie. Dès lors, si deux personnes éloignées l'une de l'autre voient en même temps un arc-en-ciel, ce n'est pas le même arc qu'elles observent. S'il en était ainsi, celle qui se trouverait située obliquement, le verrait en perspective, sous la forme d'un ovale ou d'une ellipse, non d'un cercle. La théorie et l'observation s'accordent à prouver l'impossibilité du fait que nous venons de supposer. Maintes fois nous avons entendu des personnes, à qui nous citions l'observation d'un arc-en-ciel, répondre qu'elles aussi l'avaient vu. Ces personnes se trompaient, à moins qu'elles ne se fussent précisément trouvées dans la position où nous étions nous-même au même instant.

§ II. MÉTÉORES AQUEUX. — HYGROMÉTRIE.

Les *météores aqueux* sont ceux qui ont pour cause les transformations que subit la vapeur d'eau contenue dans l'air sous l'influence des variations de température. Les nuages, les brouillards, la pluie, la neige, la rosée, la gelée blanche, le givre, sont les diverses formes sous lesquelles se présente l'eau atmosphérique, qui prend ainsi ces trois états : l'état gazeux, quand elle est à l'état de vapeur invisible ; l'état liquide, si un abaissement de température la condense en gouttelettes plus ou moins fines; l'état solide enfin, si un refroidissement plus grand encore congèle ces gouttelettes, qui tombent alors sous la forme de flocons blanchâtres, ou se déposent en cristaux ténus à la surface du sol. La description complète et l'explication détaillée de ces divers phénomènes nous entraîneraient en dehors de notre cadre. Nous allons nous borner à indiquer à quelles lois physiques se rapporte leur production.

L'analyse prouve que l'air est un mélange de deux gaz permanents, l'oxygène et l'azote, auxquels se joignent des quantités variables de vapeur d'eau et d'acide carbonique.

Mais tandis que la proportion de l'oxygène et de l'azote reste constante, celle de la vapeur d'eau varie à chaque instant et dépend de plusieurs conditions atmosphériques, de la température, de la direction et de la force des vents, etc. Il est très-important pour la météorologie de savoir déterminer quelle est, à un instant donné, ce qu'on nomme l'*état hygrométrique* de l'air. On entend par là le rapport existant entre la tension de la vapeur d'eau qui s'y trouve actuellement contenue, avec la tension maximum qu'aurait cette même vapeur si, à la température observée, l'air en était saturé.

Ce rapport se déduit des indications d'instruments appelés *hygromètres*, construits d'après différents principes, et parmi lesquels nous décrirons seulement l'*hygromètre à cheveu*, qui porte le nom de Saussure, son inventeur.

Il est fondé sur la propriété qu'ont les cheveux, comme plusieurs autres substances animales, d'être très-sensibles aux variations de l'humidité atmosphérique. Un cheveu, préalablement soumis à une lessive dans l'éther sulfurique, qui le débarrasse de la matière grasse qui l'entoure, s'allonge en absorbant la vapeur d'eau contenue dans l'air, et se raccourcit quand il perd l'humidité absorbée. Voici comment on rend appréciables ces changements de dimension. Le cheveu est fixé à une pince par son extrémité supérieure, et vient s'enrouler à une poulie dont le centre porte une aiguille mobile sur un arc de cercle divisé. Un petit poids sert à le tenir toujours tendu sur la poulie, et comme celle-ci forme avec l'aiguille un système dont l'équilibre est indifférent, la moindre variation dans la longueur du cheveu fait tourner la poulie, et, par suite, l'aiguille, dans un sens ou dans l'autre.



Fig. 452. — Hygromètre à cheveu de Saussure.

On gradue l'hygromètre en prenant pour points fixes la sécheresse extrême ou l'humidité extrême de l'air. Voici comment

on procède : on place l'instrument sous une cloche dont l'air est desséché par du chlorure de calcium, et quand l'aiguille s'est arrêtée à une position fixe, on y marque 0°. Cela fait, on porte l'appareil sous une autre cloche, dont les parois intérieures sont mouillées avec de l'eau pure : l'air contenu dans cette cloche est ainsi saturé de vapeur. L'aiguille marche dans le sens contraire, et finit par s'arrêter en un point qui correspond à l'état de l'air saturé de vapeur d'eau. On marque 100° en ce point, et l'on partage en 100 parties égales ou degrés l'intervalle compris entre les deux points fixes.

L'hygromètre ainsi construit et gradué marque bien si l'air est plus ou moins humide; mais, pour conclure d'un degré hygrométrique marqué, la tension de la vapeur d'eau de l'air rapportée à la tension de l'air saturé à la même température, on a dû construire et calculer empiriquement des tables qui donnent ce rapport. On joint ordinairement à l'hygromètre à cheveu un thermomètre, dont l'utilité se comprendra d'après ce que nous venons de dire. Les hygromètres à cheveu offrent un inconvénient, c'est que leurs indications ne sont pas rigoureusement comparables, les cheveux provenant de divers individus n'ayant pas tous au même degré la propriété d'absorber l'humidité.

L'état hygrométrique de l'air peut aussi se déduire de la température à laquelle il faut l'abaisser, pour que la vapeur qu'il renferme suffise à le saturer. Les instruments qui servent à déterminer cette température sont les *hygromètres à condensation*, ainsi nommés parce que c'est la vapeur, condensée à la surface d'un métal poli, qui indique la saturation de l'air produite par un abaissement artificiel de température : ce sont les instruments que les météorologistes préfèrent, à cause de leur précision.

En général, la quantité de vapeur de l'atmosphère augmente avec la température; elle est plus grande en mer et sur les côtes que dans l'intérieur des continents. Elle varie suivant les heures du jour, allant en croissant à mesure que s'é-

lève la température. Il en est de même pour les saisons de l'année : les plus chaudes sont celles où l'air contient la plus grande quantité absolue de vapeur d'eau. Mais l'inverse a lieu pour l'humidité relative; c'est en général, pendant la nuit ou pendant les saisons froides, qu'elle est la plus grande possible, c'est-à-dire que l'air est plus voisin de l'état de saturation. Enfin la direction des vents a aussi une grande influence sur l'état hygrométrique; mais il est impossible de donner une idée de cette influence sans entrer dans des détails extrêmement complexes, puisque les conditions atmosphériques changent d'une région du globe à une autre.

La *rosée* n'est autre chose qu'un dépôt de la vapeur d'eau contenue dans l'air, que le refroidissement des objets situés à la surface du sol a fait condenser en fines gouttelettes, pendant la nuit. La rosée apparaît surtout pendant les nuits sereines d'automne et de printemps; à ces deux époques, il y a une différence notable entre la température chaude de la journée et celle des nuits. L'atmosphère contient donc pendant le jour une assez grande quantité de vapeur; dès lors, si le ciel n'est pas couvert de nuages, le sol rayonnera dans l'espace une grande quantité de chaleur, sans que l'air lui-même se refroidisse autant dans ses couches élevées; mais le contact du sol abaissera la température des couches inférieures, qui se trouveront saturées, et la vapeur se déposera sous forme de rosée sur les corps, avec d'autant plus d'abondance que ceux-ci seront moins bons conducteurs de la chaleur et doués du plus fort pouvoir rayonnant. Les nuages empêchent le rayonnement d'être aussi intense; et d'ailleurs il y a, entre eux et le sol, échange de chaleur : c'est ce qui explique pourquoi il y a peu ou point de rosée par les temps couverts.

Quand la température des nuits s'abaisse au-dessous de zéro, la rosée déposée sur le sol se congèle en cristallisant sous forme de petites aiguilles de glace très-fines : c'est le phénomène connu sous le nom de *gelée blanche*.

Quand la condensation de la vapeur d'eau atmosphérique est déterminée par un abaissement de température des couches supérieures de l'air, les gouttes d'eau très-fines produites par cette condensation, rassemblées sur un espace plus ou moins grand, troublent la transparence de l'air et forment, soit les *nuages*, soit les *brouillards*. Les brouillards ne diffèrent d'ailleurs des nuages que par leur proximité du sol. Les nuages changent continuellement de forme; mais ce n'est pas seulement l'influence des courants aériens qui les modifie; tantôt ils se dissipent, parce que rencontrant des couches d'une température plus élevée, une partie de l'eau qui les forme repasse à l'état de vapeur; tantôt, au contraire, ils grossissent par une condensation nouvelle, et alors, si les gouttes prennent un volume et un poids plus considérable, ils tombent jusque sur le sol, présentant le phénomène de la *pluie*. Un changement de vent amène souvent la pluie, soit que des masses d'air froides se trouvent ainsi mélangées à l'air chargé de vapeurs et le saturent, soit, au contraire, que des masses d'air chaudes et chargées elles-mêmes de vapeur viennent se mêler à une atmosphère plus froide.

En hiver, quand la température est assez basse pour que les gouttes d'eau formant les nuages se congèlent, au lieu de pluie, il tombe de la *neige*. Les flocons de neige sont formés par l'agglomération de petits cristaux disposés en étoiles d'une symétrie vraiment merveilleuse. Nous reproduisons ici (fig. 453) les formes variées que le navigateur Scoresby a décrites et dessinées dans la relation de ses voyages aux mers polaires arctiques : on remarquera que le plus grand nombre d'entre elles sont des polygones hexagonaux, des étoiles à six pointes; toutes les lamelles formant les cristaux font entre elles des angles de 60° ou de 120°.

Quelquefois les gouttes d'eau des nuages, en se congelant, s'agglomèrent en petites masses irrégulières plus compactes que la neige. Elles tombent alors sous forme de *grésil*.

La forme cristalline, que prend l'eau atmosphérique en se

congelant, appartient aussi aux masses de glace compactes et transparentes que les basses températures de l'hiver produisent à la surface des étangs, des lacs et des rivières. En l'examinant à l'œil nu, la structure de la glace paraît confuse; mais Tyndall a réussi à mettre en évidence sa forme cristalline, par une expérience très-curieuse qui consiste à faire traverser un bloc de glace par un faisceau de lumière solaire ou de lumière électrique. La chaleur du faisceau est en partie absorbée par les molécules dont le bloc est composé et le retour à l'état liquide se fait peu à peu dans son sein. En examinant à la loupe ce qui se passe à l'intérieur du bloc, ou en projetant

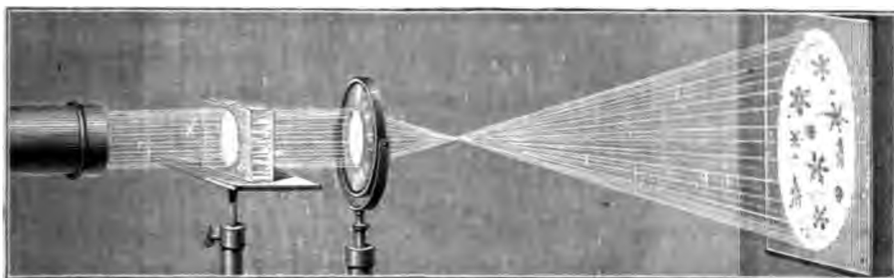


Fig. 454. — Dissection d'un bloc de glace par la chaleur solaire. Structure cristalline de la glace.

son image au moyen d'une lentille sur un écran, on assiste au travail de décomposition dont nous parlons. On voit apparaître çà et là des fleurs étoilées à six rayons, dont les bords se couvrent de dentelures. Au centre de chacune se trouve une tache présentant le lustre de l'argent bruni. Tyndall a fait voir que cette tache est un vide dont la production est due à la diminution de volume subie par la glace qui passe à l'état liquide; de sorte que ce phénomène curieux pourrait servir à démontrer la contraction de l'eau résultant du passage de l'état solide à l'état liquide.

Tous les phénomènes que nous venons de décrire sommairement et que nous avons réunis sous la dénomination commune de météores aqueux, parce que c'est l'eau à ses divers états qui en forme la substance, ont pour cause les variations

de la température. Ce dernier élément a donc, en météorologie, une grande importance; d'ailleurs son influence sur les êtres organisés et vivants, végétaux et animaux, sur leur production, leur développement, en un mot sur la vie à la

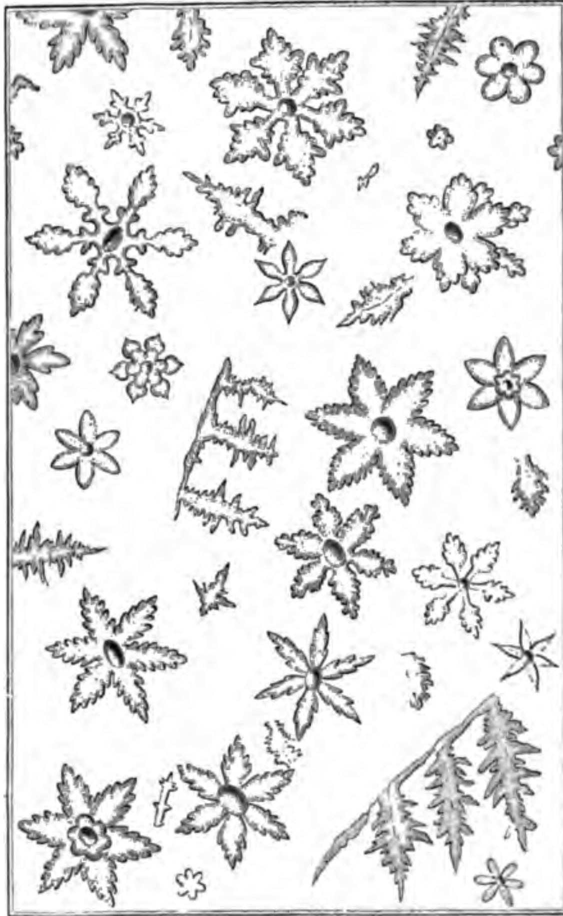


Fig. 455. — Fleurs de la glace, d'après Tyndall.

surface du globe, est si grande, elle agit d'une façon si continue sur la santé de l'homme et de ses auxiliaires, que le problème qui consiste à déterminer ses variations, sa périodicité, ses anomalies est à coup sûr un des plus intéressants de la science météorologique. Mais sa complexité est telle, qu'il n'est pas possible de l'aborder ici, même en l'effleurant. Nous nous

contenterons de décrire les instruments qui servent aux observations de la température de l'air. Nous connaissons déjà différentes espèces de thermomètres employés dans ce but : il nous reste seulement à parler de la forme qu'on leur donne, quand on veut connaître la température la plus élevée ou la température la plus basse que peut atteindre l'air dans un certain intervalle de temps.

Ce sont les *thermomètres à maxima et à minima.*

La figure 456 représente un instrument de ce genre imaginé par Rutherford. Ce sont deux thermomètres, l'un à mercure, l'autre à alcool, disposés horizontalement sur une planchette. A l'intérieur du tube du premier repose, sur la surface du mercure, un petit cylindre d'acier ou d'émail, que le liquide pousse devant lui tant que la température s'élève, mais qu'il

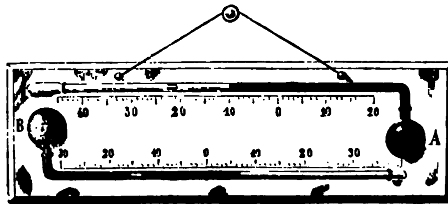
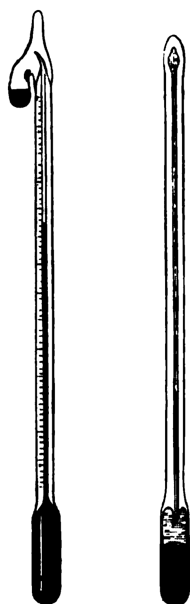


Fig. 456.— Thermomètres à maxima et à minima de Rutherford.

laisse en place, au point le plus éloigné de sa course, quand la température vient à baisser. La base la plus voisine du mercure indique évidemment la température maximum. Dans le tube du thermomètre à alcool se trouve un cylindre en émail que l'alcool mouille et laisse en place, quand la température s'élève, et qu'il entraîne au contraire avec lui, quand elle s'abaisse. Le minimum est donc donné par la base du cylindre, opposée au réservoir. Quand on veut installer l'instrument pour une observation, il faut avoir soin de ramener les deux index aux extrémités de chaque colonne liquide : l'un repose alors sur le mercure, et l'autre, noyé dans l'alcool, affleure la surface du liquide par sa base la plus éloignée du réservoir.

Pour observer les températures maximum et minimum à cer-

taines profondeurs, dans l'eau de la mer ou des lacs, dans les puits artésiens, on emploie les thermomètres à déversement parmi lesquels nous décrirons ceux de M. Walferdin, les plus appréciés par les physiciens.


Fig. 457. — Thermomètres à maxima et à minima de M. Walferdin.

Le thermomètre *à maxima* est construit comme un thermomètre à mercure ordinaire; mais l'extrémité du tube est effilée en pointe, et enveloppée d'une panse latérale qui contient une certaine quantité de mercure. Quand on veut observer, on chauffe le réservoir jusqu'à ce que le mercure remplisse entièrement le tube; puis, on renverse l'instrument, le réservoir en haut; le mercure de la panse affleure la pointe, et en laissant refroidir à une température plus basse que celle du maximum qu'on veut déterminer, le tube reste toujours rempli entièrement de mercure, grâce à l'affleurement de la pointe avec le mercure de la panse. On porte alors l'instrument, ainsi amorcé, dans le milieu à observer. Tant que la température s'élève, le mercure se déverse par la pointe, et au moment du maximum le tube sera encore rempli. L'instrument retiré du milieu, on trouve la température du maximum en échauffant le thermomètre dans l'eau, jusqu'à ce que la colonne de mercure affleure de nouveau au sommet de la pointe. Dans le thermomètre *à minima*, la pointe est en bas, près du réservoir qui renferme du mercure et une certaine quantité d'alcool. Quand on veut observer, on refroidit l'instrument à une température inférieure à celle du minimum supposé; puis on le renverse et une certaine quantité de mercure entre dans le tube par la pointe. Le thermomètre étant plongé dans le milieu à observer, tant que la température s'abaisse, l'index de mercure du tube descend, et une partie du mercure tombe dans le réservoir. Puis il remonte,

si la température s'élève. L'instrument retiré, on le plonge dans un bain qu'on refroidit, jusqu'à ce que le mercure de l'index affleure de nouveau à l'extrémité de la pointe.

On a vu, dans le chapitre VI du livre I[er], comment les baromètres accusent, par les variations de niveau du mercure, les variations correspondantes de la pression de l'atmosphère. Ces oscillations de la colonne barométrique ont des causes accidentelles très-complexes. Si la colonne atmosphérique qui surmonte un point du sol était toujours en repos, la pression ne dépendrait que du poids de l'air dont cette colonne se compose, à laquelle il faudrait joindre la pression résultant de l'élasticité de la vapeur d'eau qui s'y trouve mélangée. Or cet état d'équilibre n'existe jamais, pour ainsi dire, en aucun lieu du globe. Les raisons en sont faciles à concevoir, et toutes, d'ailleurs, se ramènent plus ou moins directement à la même cause, qui est l'action de la chaleur solaire.

Le soleil échauffe très-inégalement le sol d'un lieu et les couches d'air superposées, suivant l'heure du jour et suivant l'époque de l'année. Plus cette action calorifique est considérable, plus les couches d'air sont dilatées, plus elles s'élèvent par leur diminution de densité. Mais comme, au même instant, des régions plus ou moins éloignées de la première se trouvent dans des circonstances différentes, l'équilibre se trouvera rompu : il y aura par en haut écoulement des couches d'air les plus élevées, de la région la plus chaude vers les plus froides; et, par en bas, mouvement en sens contraire, c'est-à-dire écoulement des couches d'air plus denses et plus froides vers la région chaude. Ce transport des masses d'air d'un lieu dans un autre est la cause des vents. Or, il est aisé de comprendre qu'au début de ce mouvement, il se produira une diminution dans la pression barométrique, là où l'air s'est dilaté par l'élévation de température; il y aura au contraire augmentation, là où la température est plus faible, le poids de l'air s'y trouvant augmenté de tout le poids des couches

qui se sont épanchées à la surface supérieure de l'atmosphère. Mais il ne faut pas oublier que l'action calorifique du soleil produit en même temps un effet opposé. La vapeur d'eau contenue dans l'air augmente d'élasticité quand la température s'élève, de sorte que si la colonne barométrique s'abaisse quand la densité de l'air diminue, en même temps, elle monte sous l'influence de l'accroissement de tension de la vapeur d'eau : c'est de la différence de ces deux mouvements contraires que résulte la variation barométrique.

Enfin, il est probable que les courants atmosphériques agissent d'une autre manière sur le baromètre. Par exemple, si un courant aérien vient à se propager de haut en bas, son influence ne dépendra pas seulement de son poids, mais encore de la vitesse avec laquelle la masse gazeuse se trouvera transportée, de sorte que, comme le dit très-bien M. Marié-Davy, si les vents ont pour cause originaire une différence de pression occasionnée par des inégalités de température, ils réagissent eux-mêmes en produisant des variations de pression.

On a reconnu qu'en un même lieu, la hauteur barométrique éprouve des oscillations diurnes et des variations qui suivent les saisons de l'année : les unes et les autres sont soumises à une périodicité qui s'accorde avec les explications précédentes. Mais cette même hauteur est soumise à des variations irrégulières dont les causes sont extrêmement complexes. Ainsi, le baromètre hausse ou baisse selon la direction du vent régnant. A Paris et dans une grande partie de l'Europe, la pression barométrique est généralement plus élevée par les vents du nord, du nord-est et de l'est, que par les vents du sud, du sud-est et du sud-ouest. Dans l'hémisphère austral, le contraire a lieu.

§ III. MÉTÉORES ÉLECTRIQUES ET MAGNÉTIQUES. — LES AURORES POLAIRES.

Dès 1735, Gray signalait l'analogie qui existe entre l'éclair et le bruit du tonnerre pendant les orages, avec l'étincelle et

le bruit sec produits par une décharge électrique. Mais c'est à Franklin que revient l'honneur d'avoir établi, par des expériences décisives, l'identité de cause de ces deux ordres de phénomènes. En 1749, l'illustre physicien, après avoir noté toutes les ressemblances entre la foudre et l'électricité, en partie signalées du reste par les observateurs qui l'avaient précédé, concevait la possibilité d'utiliser le pouvoir des pointes pour préserver les édifices de l'atteinte du fléau. Il donnait en même temps toutes les indications propres à reconnaître par l'expérience l'électrisation des nuées orageuses. Trois ans plus tard, il se servait d'un cerf-volant surmonté d'une pointe métallique, pour tirer des étincelles de la corde mouillée par la pluie. Presque à la même époque, Dalibard réalisait, dans sa célèbre expérience de Marly-la-Ville, les conditions de celle qu'avait proposée Franklin, et de Romas lançait à Nérac un cerf-volant électrique. Pendant un orage assez faible, ce dernier observateur put tirer des étincelles d'une longueur de 4 mètres, qu'il faisait jaillir de l'extrémité de la corde avec un excitateur; les explosions étaient comparables à celles d'une arme à feu. Enfin, de Saussure reconnut à l'aide d'un électroscope surmonté d'une tige métallique, que les nuages orageux étaient électrisés, tantôt positivement, tantôt négativement. Quand deux nuages chargés d'électricités contraires se trouvent en présence, la combinaison violente des deux électricités donne lieu à la production d'une étincelle qui n'est autre que l'*éclair*. Si c'est entre un nuage et le sol qu'a lieu la décharge, le même phénomène lumineux a lieu, mais alors on dit que le tonnerre tombe, et l'éclair prend le nom de *coup de foudre*.

La forme des éclairs est tantôt celle d'une courbe sinueuse, tantôt celle de traits rectilignes en zigzag; d'autres fois, ils n'affectent aucune forme précise et déterminée et ne donnent qu'une lueur confuse illuminant toute la portion du ciel où ils apparaissent: mais cette dernière apparence tient le plus souvent, du moins il est probable, à l'interposition de nuages

qui masquent l'étincelle à l'observateur. Enfin, on distingue aussi les *éclairs en boules* qui se meuvent comme des globes de feu à travers l'atmosphère,. avec une vitesse beaucoup moindre que celle des autres éclairs. Il arrive assez fréquemment que l'étincelle électrique des nuées orageuses se divise en plusieurs branches, formant ce qu'on nomme des éclairs ramifiés. Cette année même, nous avons observé un grand nombre d'éclairs simples, à peine sinueux, et jaillissant verticalement entre le nuage et la terre; nous en avons observé deux ou trois dont les branches divergeaient comme les rayons d'une étoile.

La couleur de la lumière des éclairs est tantôt blanche, tantôt purpurine ou violacée, tantôt verdâtre.

Wheastone a mesuré pendant la nuit, à l'aide d'une méthode fort ingénieuse, la durée moyenne des éclairs. Il se servait d'une roue portant un grand nombre de rayons d'argent mat, qu'il faisait tourner avec une grande rapidité sur son axe. La roue étant subitement illuminée pendant sa rotation par une lumière dont la durée est appréciable, par exemple de $\frac{1}{10}$ de seconde, chaque rayon se déplaçant pendant ce temps semblera élargi à cause de la persistance des impressions lumineuses sur la rétine; le champ de la roue paraîtra plus ou moins continu. C'est ainsi que la roue d'une voiture qui passe rapidement devant nous, nous semble avoir une multitude de rais. Or, Wheastone eut beau accroître la rapidité de la rotation : toujours, quand un éclair venait à illuminer la roue, celle-ci semblait immobile, et tous ses rais restaient distincts pour la vue et en repos. Il conclut de nombreuses expériences, que l'éclair ne dure pas même un millième de seconde.

La violence de la décharge qui s'effectue entre deux nuages orageux donne lieu au bruit que nous connaissons sous le nom de tonnerre. Il est à remarquer que l'explosion est d'autant plus brusque et plus éclatante que l'éclair jaillit à une moindre distance de l'observateur; mais dans presque tous

les cas, la détonation est accompagnée d'un roulement prolongé. La cause de cette persistance du bruit de la décharge est due probablement à deux causes. D'abord, on a constaté que les éclairs ont souvent plusieurs kilomètres de longueur. Les deux extrémités peuvent être plus voisines l'une que l'autre de la personne qui écoute; et, bien que le son soit produit au même instant sur toute l'étendue de l'éclair, comme il met une seconde pour parcourir 340 mètres, c'est près de neuf à dix secondes pour une distance de 10 kilomètres. De plus, le bruit se répercute sur les nuages et sur le sol, donnant lieu à des échos plus ou moins prolongés. La forme des éclairs en zigzag explique bien aussi comment il se fait que le roulement du tonnerre ne s'affaiblit pas d'une manière continue, et que, pendant sa durée, on l'entend redoubler de force à plusieurs reprises.

Les effets des coups de foudre ont une parfaite analogie avec ceux que nous avons vus produits par les décharges électriques, dans les machines et les batteries. Seulement, ils sont infiniment plus intenses, comme on peut le prévoir d'après la grandeur prodigieuse de l'échelle sur laquelle opère la nature. On les a vus renverser, transporter à distance des masses considérables, des murailles, des blocs de rocher, fondre et volatiliser les métaux, percer des trous dans le sable, qui se trouve alors vitrifié tout autour et forme une sorte de tube connu sous le nom de *fulgurite.* Ce dernier et singulier phénomène a été reproduit à l'aide de la grande batterie du Conservatoire des Arts et Métiers, et l'on a obtenu des tubes semblables aux fulgurites, en faisant passer une décharge à travers une couche formée de sable mêlé de sel.

Nous avons dit plus haut que la foudre renverse quelquefois les pôles des aiguilles dans les boussoles, ou les désaimante complétement : d'autres fois, elle produit un phénomène inverse et aimante les pièces d'acier qu'elle frappe. Ses effets physiologiques ne sont pas moins curieux : malheureusement ils sont souvent terribles. Les hommes et les animaux frappés

de la foudre sont souvent tués sur le coup. Il est vrai qu'on cite deux ou trois exemples, où la commotion produite par elle a guéri des personnes atteintes de paralysie et de rhumatisme. Les nuages orageux, en passant au-dessus des objets situés sur le sol, les électrisent par influence. Telle est la cause des aigrettes lumineuses qu'on voit quelquefois au sommet des pointes des édifices, des mâts et des vergues des navires. Ces lueurs que les anciens regardaient comme des présages, et que les marins nomment aujourd'hui le *feu Saint-Elme*, s'expliquent tout naturellement par la tension électrique considérable que prennent les conducteurs, terminés en pointe.

Nous avons déjà dit un mot du magnifique phénomène connu sous le nom d'*aurore polaire*, et qui se montre avec toute sa beauté dans les régions boréales et australes de notre globe. Il n'est pas douteux aujourd'hui qu'il y ait une relation entre ce phénomène lumineux et le magnétisme terrestre, c'est-à-dire entre la production de l'aurore boréale et les variations des courants électriques qui sillonnent la Terre. Arago a établi par des observations précises, la coïncidence de certaines perturbations de l'aiguille aimantée avec la production du météore. Ces agitations commencent plusieurs heures avant l'apparition de la lumière et elles sont de plus en plus intenses pendant toute sa durée. Une magnifique expérience de M. de la Rive a mis d'ailleurs hors de doute la nature électrique ou magnétique des aurores.

Les aurores boréales sont visibles jusque dans nos climats; mais elles y sont rares et de courte durée. « Dans le Nord, dit M. Charles Martins, le phénomène se montre avec un éclat et une magnificence tels, que rien ne saurait lui être comparé. Brillant et varié comme celui d'un feu d'artifice, ce spectacle change à chaque instant. Le peintre n'a pas le temps de saisir les formes et les teintes de ces lueurs fugitives; le poëte doit renoncer à les décrire. Jamais une aurore boréale ne

ressemble à l'autre; elles varient jusqu'à l'infini. » *(Du Spitzberg au Sahara.)* L'aurore boréale que nous avons reproduite (page 571) dans la planche IX d'après les belles planches du *Voyage au Spitzberg et en Laponie*, et dont l'observation et la description sont dues à M. Lottin, peut donner une idée de la magnificence du phénomène. Voici du reste une description que nous empruntons à M. Ch. Martins, l'un des savants qui avec MM. Bravais, Lottin, etc., composaient la commission scientifique de l'expédition.

« Tantôt les aurores, dit-il, sont de simples lueurs diffuses ou des plaques lumineuses; tantôt des rayons frémissants d'une éclatante blancheur, qui parcourent tout le firmament en partant de l'horizon, comme si un pinceau invisible se promenait sur la voûte céleste : quelquefois il s'arrête; les rayons inachevés n'atteignent pas le zénith, mais l'aurore se continue sur un autre point; un bouquet de rayons s'élance, s'élargit en éventail, puis pâlit et s'éteint. D'autres fois de longues draperies dorées flottent au-dessus de la tête du spectateur, se replient sur elles-mêmes de mille manières et ondulent comme si le vent les agitait. En apparence, elles semblent peu élevées dans l'atmosphère, et l'on s'étonne de ne pas entendre le frôlement des replis qui glissent l'un sur l'autre. Le plus souvent, un arc lumineux se dessine vers le nord; un segment noir le sépare de l'horizon, et contraste par sa couleur foncée avec l'arc d'un blanc éclatant ou d'un rouge brillant qui lance les rayons, s'étend, se divise et représente bientôt un éventail lumineux qui remplit le ciel boréal, monte peu à peu vers le zénith où les rayons, en se réunissant, forment une couronne qui, à son tour, darde des jets lumineux dans tous les sens. Alors le ciel semble une coupole de feu; le bleu, le vert, le jaune, le rouge, le blanc se jouent dans les rayons palpitants de l'aurore. Mais ce brillant spectacle dure peu d'instants. La couronne cesse d'abord de lancer des jets lumineux, puis s'affaiblit peu à peu : une lueur diffuse remplit le ciel; çà et là, quelques plaques lumineuses, semblables à de légers

nuages, s'étendent et se resserrent avec une incroyable activité, comme un cœur qui palpite. Bientôt elles pâlissent à leur tour; tout se confond et s'efface; l'aurore semble être à son agonie. Les étoiles que sa lumière avait obscurcies, brillent d'un nouvel éclat, et la longue nuit polaire, sombre et profonde, règne de nouveau en souveraine sur les solitudes glacées de la terre et de l'Océan. »

Bravais, en discutant les formes d'un grand nombre d'arcs choisis parmi les plus réguliers, et simultanément observés par deux observateurs, l'un placé à Bossekop, l'autre à Jupvig distant de 15 kilomètres de la première station, a fait voir que tous peuvent être considérés comme les perspectives d'anneaux circulaires ayant leur centre sur le rayon de la Terre dirigé vers le pôle magnétique, et leur plan perpendiculaire à ce rayon. Il en a conclu en outre que la hauteur des anneaux au-dessus de la surface du sol est comprise entre 100 et 200 kilomètres, de sorte que ces météores se ferment dans la région où l'on place les limites extrêmes de l'atmosphère.

L'éclat des plus brillantes aurores est considérable. Bravais pouvait lire à cette lumière une page imprimée en petit texte, presqu'aussi aisément qu'à la lumière de la pleine lune. Les aurores sont donc, pour les rares habitants des régions glacées voisines des pôles, un phénomène bienfaisant, une distraction dans les longues nuits de toute une moitié de l'année; elles contribuent avec les clartés de la lune et du crépuscule, à en détruire la tristesse et la monotonie.

FIN.

TABLE DES FIGURES.

PLANCHES EN COULEUR, TIRÉES HORS DU TEXTE.

FIGURES INSÉRÉES DANS LE TEXTE.

FIN DE LA TABLE DES FIGURES.

TABLE DES MATIÈRES.

LIVRE DEUXIÈME.

LE SON.

LIVRE TROISIÈME.

LA LUMIÈRE.

LIVRE QUATRIÈME.

LA CHALEUR.

LIVRE CINQUIÈME.

LE MAGNÉTISME ET L'ÉLECTRICITÉ.

LIVRE SIXIÈME.

LES MÉTÉORES ATMOSPHÉRIQUES.

FIN DE LA TABLE DES MATIÈRES.

10202 — Imprimerie générale de Ch. Lahure, rue de Fleurus, 9, à Paris.



